



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie

Využití odpadních plastů v tepelně izolačních kompozitech.

**The Utilization of Waste Plastics in Thermal Insulation
Composites.**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Adam Pivák

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: Ing. Martina Záleská

Praha, 2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Pivák Jméno: Adam Osobní číslo: 423721
Zadávací katedra: Katedra materiálového inženýrství a chemie
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Využití odpadních plastů v tepelně izolačních kompozitech.

Název bakalářské práce anglicky: The Utilization of Waste Plastics in Thermal Insulation Composites.

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte kompozitní tepelně izolační materiál na bázi hořčnatého pojiva s využitím odpadního plastu jako plniva.

Z navržené záměsi připravte vzorky kompozitního materiálu a po zatvrdnutí stanovte základní materiálové parametry, mechanické a tepelně-technické vlastnosti.

Povrch materiálu ošetřete lněnou fermeží a ověřte odolnost materiálu vůči působení plynné a kapalně vody.

Seznam doporučené literatury:

Iucolano F., B. Liguori, B., Caputo, D., Colangelo, Cioffi, R. (2013) Recycled plastic aggregate in mortars composition. Part 1: Effect on physical and mechanical properties. Materials and Design, 52, pp. 916-922.

ČSN EN 14016-1 Látky pro hořčnatou maltovinu pro potěrové materiály-Kaustický magnezit a chlorid hořčnatý-Část 1: Definice, požadavky, 2005.

ČSN EN 14016-1 Látky pro hořčnatou maltovinu pro potěrové materiály-Kaustický magnezit a chlorid hořčnatý-Část 2: Zkušební metody, 2005.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Martina Záleská

Datum zadání bakalářské práce: 12.2.2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

12.2.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucí Ing. Martiny Záleské

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal(a), jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....
podpis

Poděkování:

Děkuji vedoucí práce Ing. Martině Záleské za její odborné vedení a dobré rady, prof. Ing. Zbyšku Pavlíkovi Ph.D. a prof. Ing. Mileně Pavlíkové Ph.D. za téma této práce a Ing. Jaroslavu Pokornému s Ing. Lucií Zemanovou za jejich pomoc a odborné rady.

Anotace:

Tato práce je zaměřena na využití odpadních plastů. Produkce plastů každým rokem narůstá a s ní také množství plastového odpadu. Některé odpadní plasty se recyklují pouze v malé míře. Takovým plastem je také expandovaný polypropylen (EPP). Cílem bylo vyrobit kompozitní materiál s odpadním plastovým plnivem, použitelný jako prefabrikovaný panel nebo podlaha s tepelně izolačními vlastnostmi. Jako pojivo byla vybrána hořečnatá maltovina, která je schopna pojmout vyšší množství plniva než běžný beton. Také zatěžuje méně životní prostředí. Experimentálně byly vyrobeny kompozity obsahující 150 % náhradu písku plnivem z odpadního EPP. Měřeny byly základní charakteristiky, pevnostní, tepelně-technické a vlhkostní vlastnosti s vlivem hydrofobizace.

Klíčová slova: *hořečnatá maltovina, odpadní plast, tepelná izolace, expandovaný polypropylen*

Abstract:

This work is focused on use of waste plastics. Production of plastics rises every year and so production of waste plastics. Some waste plastics are recycled only in small quantities. Expanded polypropylene (EPP) is such plastic material. The aim of this work was to manufacture composite material containing waste plastics as filler. Composite material can be used as precast panels or flooring with thermal insulating properties. As binder was chosen magnesium oxychloride cement (MOC). MOC can incorporate higher quantity of filler than concrete. MOC is also less harmful to environment. As an experiment, composites containing 150 % replacement of sand with waste EPP filler. Basic characteristics, strength properties, thermal insulating properties, water resistance and influence of hydrophobization were measured.

Keywords: *magnesium oxychloride cement, plastic waste, thermal insulation, expanded polypropylene*

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
1 Úvod.....	10
2 Teoretická část.....	13
2.1 Hořčnaté pojivo	13
2.1.1 Hlavní suroviny výroby MgO	14
2.1.2 Výroba a typy MgO.....	16
2.2 Vliv MgO na životní prostředí v porovnání s portlandským cementem	17
2.3 Faktory ovlivňující pevnost kompozitů na bázi kaustického magnezitu	20
2.3.1 Molární poměr složek.....	21
2.3.2 Koncentrace roztoku $MgCl_2$	23
2.3.3 Teplotní režim zrání materiálu na bázi MOC.....	24
2.4 Polymery	26
2.4.1 Historie plastů	26
2.4.2 Zpracování odpadních plastů ve stavebních konstrukcích	27
2.4.3 Expandovaný polypropylen (EPP)	28
2.5 Lněná fermež.....	29
3 Experimentální část.....	29
3.1 Použité materiály pro výrobu kompozitů	29
3.2 Příprava vzorků	31
3.3 Použité metody měření.....	32
3.3.1 Zkouška rozlitím	32
3.3.2 Doba tuhnutí.....	33
3.3.3 Objemová hmotnost	33
3.3.4 Hustota matrice	34
3.3.5 Pórovitost	35
3.3.6 Dynamický modul pružnosti	35
3.3.7 Pevnost v tahu za ohybu.....	35
3.3.8 Pevnost v tlaku	36
3.3.9 Tepelně-technické vlastnosti	36
3.3.10 Měření transportu vodní páry miskovou metodou bez teplotního spádu	37
3.3.11 Transport kapalné vody metodou vertikální nasákavosti	39
3.4 Výsledky měření a diskuse.....	40
3.4.1 Rozliv hořčnaté maltoviny	40
3.4.2 Doba tuhnutí.....	40
3.4.3 Základní materiálové vlastnosti	40
3.4.4 Mechanické vlastnosti	41
3.4.5 Tepelně-technické vlastnosti	42
3.4.6 Transport vodní páry	43
3.4.7 Transport kapalné vody	43
4 Závěr.....	44

5	Literatura	45
	Seznam obrázků	49
	Seznam tabulek.....	50

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbols:

m	[kg]	hmotnost
V	[m ³]	objem
T	[°C, °K]	teplota
ρ_v	[kg/m ³]	objemová hmotnost
ρ_{mat}	[kg/m ³]	hustota
-	[°Bé]	stupeň hustoty Baumé
ψ	[-, %]	pórovitost
F	[N]	síla zatížení
f_{cf}	[MPa]	pevnost v tahu za ohybu
f_c, σ	[MPa]	pevnost v tlaku
E	[MPa]	dynamický modul pružnosti
λ	[W/m.K]	součinitel tepelné vodivosti
c_v	[J/m ³ .K]	měrná tepelná kapacita
a	[m ² /s]	součinitel teplotní vodivosti
R	[m ² .K/W]	tepelný odpor
U	[W/m ² .K]	součinitel prostupu tepla
δ	[s]	součinitel difúzní vodivosti
D	[m ² /s]	součinitel difúze vodní páry
μ	[-]	faktor difúzního odporu
A	[kg/m ² .s ^{1/2}]	absorpční koeficient vody
S	[m/s ^{1/2}]	sorptivita

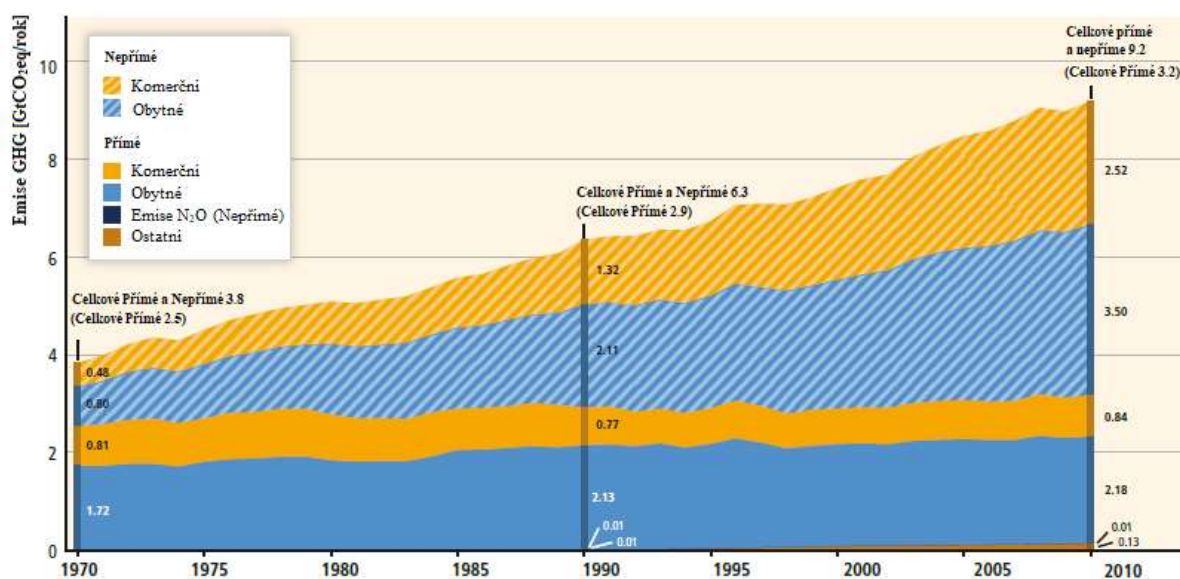
Zkratky:

GHG	Greenhouse Gas, skleníkové plyny
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
USA	Spojené státy americké
EU	Evropa
MOC	Magnesium Oxychloride Cement
PC	Portlandský Cement
LCA	Life Cycle Assessment, posouzení životního cyklu
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
EPP	Expandovaný Polypropylen
PB	Polybuten
PVC	Polyvinylchlorid
PS	Polystyren
EPS	Extrudovaný Polystyren
PUR	Polyuretan

1 Úvod

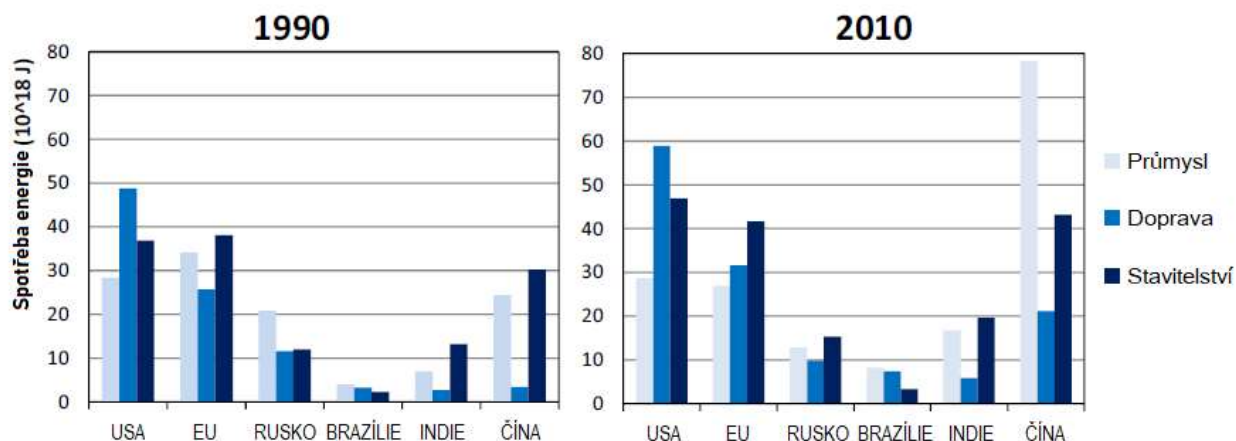
V dnešní době narůstá obava o životní prostředí z důvodů celosvětově se zvyšující spotřeby energie [1]. Na životní prostředí má vliv narůstající množství obyvatel, vyčerpání dosavadních nerostných surovin, nedostatek energie, zvyšující se koncentrace skleníkových plynů (Greenhouse Gas-GHG) a s tím související změny klimatu. Pokud nenastanou výrazné změny v současném využívání energie, dojde podle International Energy Agency (IEA) k dvojnásobnému nárůstu emisí oxidu uhličitého (CO_2). Dále se předpokládá zvýšený nárůst poptávky po nerostných surovinách. Značný podíl na spotřebě energie mají budovy. Budovy v některých rozvojových zemích spotřebovávají až 40 % z celkové spotřeby energie dané země a produkují 40 % celkových emisí GHG [2]. Celkovou spotřebu energie na provoz stavby je možné snížit efektivnějším provozem objektů a zvýšením jejich tepelně izolačních vlastností [3].

Pokud se zaměříme na emise, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) stanovilo jejich dvojnásobný nárůst mezi roky 1970 a 2010 [4]. Tento nárůst je znázorněn na Obr. 1. Hodnoty jsou uvedeny v gigatunách ekvivalentu CO_2 za rok. Emise jsou rozděleny na přímé a nepřímé [5]. Přímé emise GHG jsou uvolněny při dané aktivitě (výroba energie, vytápění, spalování pohonných hmot nebo ukládání odpadu). Nepřímé emise GHG se uvolňují během celé životnosti výrobku až po jeho likvidaci (výstavba, výroba materiálů). Z Obr. 1 vyplývá, že nejvíce emisí GHG budov je nepřímých.



Obr. 1: Přímé a nepřímé emise GHG u komerční a obytných budov [4].

Od roku 1990 do roku 2010 došlo k velkému růstu spotřeby energie v zemích USA, EU, Ruska, Brazílie, Indie a Číny [1]. Podle Obr. 2 se od roku 1990 snížila spotřeba energie průmyslu, kdy se státy USA a EU ekonomicky zaměřili z výroby na služby. Situace je jiná v ostatních státech, kde došlo k vysokému nárůstu ve všech oblastech.



Obr. 2: Spotřeba energie v rozdílných oblastech v roce 1990 a 2010 [1].

Z Obr. 2 je patrné, že k největšímu nárůstu v průmyslu za 20 let došlo v Číně. V roce 2012 bylo vyrobeno 1,5 miliardy tun oceli, z toho 46 % bylo vyrobeno a zpracováno v Číně. V Číně bylo také v roce 2012 vyrobeno 2,2 miliardy tun cementu [6]. Emise z výroby cementu způsobuje spalování paliv na kalcinaci surovin při teplotě 1450 °C a chemické reakce kalcinace. Přibližně 40 % emisí z výroby cementu vzniká spalováním paliv, dalších 50 % z reakcí kalcinace, zbylých 10 % vzniká dopravou surovin a jejich drcením. Emise spalováním je možné snížit efektivnější technologií a změnou spalovaného paliva. Emise způsobené chemickou reakcí lze snížit pouze snížením produkce cementu a cementových výrobků. Za rok 2009 bylo průměrně vyprodukováno 633 kg CO₂ na jednu tunu cementu, nejsou zde započítány emise alternativních paliv [6].

Alternativními změnami energetické náročnosti výroby cementu a betonových kompozitů jsou:

- 1) Snížení emisí a změna paliva: Cementové pece spalují nejvíce jako palivo uhlí. Spalována mohou být také jiná fosilní a odpadní paliva, která mají nižší produkci emisí CO₂, ale vyšší spotřebu energie na tunu cementu z důvodů dodatečných úprav (předsušení). Odpadní paliva se k výrobě cementu používají v posledních dvaceti letech v USA, Kanadě, Japonsku a Evropě. Ve velké míře se používají v Nizozemsku (83 %) a Švýcarsku (43 %). Odpadní paliva jsou spalována za přísných podmínek, protože jejich emise mohou způsobit zvýšení koncentrace částic v ovzduší nebo kyselé deště [6].

- 2) Snížením poptávky: Spotřebu betonu lze snížit snížením výstavby betonových konstrukcí a infrastruktury, nebo jejím efektivnějším využíváním. Betonové konstrukce se navrhují na životnost 50, 80 nebo 100 let, ve východní Asii na méně než 40 let. Přitom betonové konstrukce mohou vydržet při pravidelné údržbě i 200 let. Další variantou jsou změny designu sídel, zvýšení počtu lidí pracujících a obývajících jednu budovu [6].
- 3) Snížení spotřeby materiálu: U betonových stavebních konstrukcí se nacházejí dvě možná řešení vysoké náročnosti výroby. Snížením spotřeby cementu v betonových konstrukcích a recyklací již použitých stavebních betonových dílců. Ke snížení množství cementu můžeme dospět změnou tvaru a průřezu betonové konstrukce, nebo lze použít vysokopevnostní nebo ultra-vysokopevnostní beton. Tyto změny vedou k nižší spotřebě betonu a tím k nižší spotřebě cementu. Dále je možné spotřebu snížit použitím příměsí, například vysokopevnostní strusky, popílku, nebo použitím jiného pojiva [6].

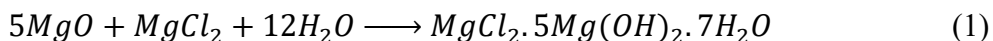
Plastové materiály jsou díky svým vhodným vlastnostem a nízké ceně velice rozšířené v celé řadě odvětví, například v elektronice, sportovním vybavení nebo automobilovém průmyslu. Díky těmto vhodným vlastnostem spotřeba plastů stále roste, s tím je spojená i rostoucí produkce odpadních plastů [7]. Tyto plasty v životním prostředí degradují pomalým tempem a mohou přírodu zatěžovat i desítky let. Tento odpad může za určitých podmínek vypouštět toxické látky do ovzduší a zeminy a tím přírodu znečišťovat [8]. V roce 2016 bylo celosvětově vyrobeno 335 milionů tun plastů, z toho 60 milionů tun v Evropě. Největším producentem plastů je Čína (29 %), následována Evropou (19 %) a Severní Amerikou (18 %). PlasticsEurope předpovídalo nárůst produkce plastů o 2,5 % v roce 2017 a o dalších 1,5 % v roce 2018. Nejvíce se plasty využívají jako balicí prostředky, například jako obaly potravinových výrobků nebo plastové tašky. V roce 2016 bylo v Evropě vyprodukováno 27,1 milionu tun plastového odpadu. 31,1 % tohoto odpadu bylo zrecyklováno, 41,6 % bylo zpracováno na zisk energie a 27,3 % bylo uloženo na skládkách. Největší podíl na evropském trhu s plasty má polypropylen (PP), celkem 19,3 % trhu [7]. V roce 2012 bylo PP v USA na druhém místě produkce, bylo ho vyrobeno 7,2 milionu tun, což tvoří 22,6 % na trhu. Z toho bylo zrecyklováno pouze 0,6 % plastu [8]. I přes veškerou snahu zůstává na skládkách část odpadu, kterou nelze zrecyklovat nebo jinak zpracovat. Jednou z možností, jak s tímto odpadem naložit, je použít odpadní plast ve stavebním kompozitním materiálu. Odpadní plast by byl nejen uložen ve stavební konstrukci, ale také by mohl mít příznivý vliv na funkci konstrukce (například pevnost nebo tepelně technické vlastnosti).

Plastový odpad by mohl být zpracován v běžném betonu. Pokud ovšem budeme chtít snížit zatížení životního prostředí jak od odpadního plastu i produkce GHG z výroby stavebního materiálu, může být jako kompozitní materiál použit alternativní pojivo, konkrétně hořečnatou maltovinu.

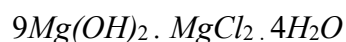
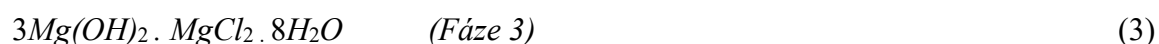
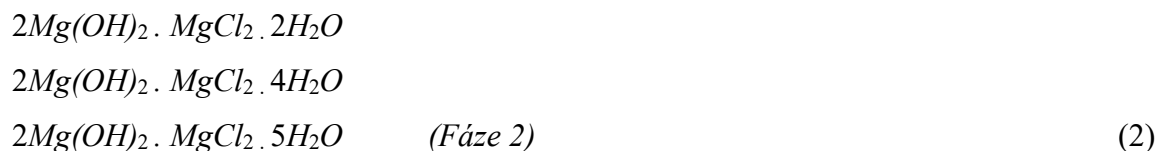
2 Teoretická část

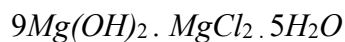
2.1 Hořečnaté pojivo

MgO se ve stavebnictví používalo pouze jako přísada do betonů, dokud nebyla v roce 1867 vynalezena hořečnatá maltovina. Vynalezl ji francouzský inženýr Stanislas Sorel krátce po objevení Portlandského cementu. Tato vzdušná maltovina je také nazývána Sorelův cement (magnesium oxychloride – MOC) [9]. Je vyráběna smícháním lehce páleného MgO s roztokem chloridu hořečnatého ($MgCl_2$) dle chemické rovnice [10]:



Hořečnatá maltovina má několik výhod oproti portlandskému cementu, odolává žáru, obruš, chemikáliím, rychle tuhne. MOC dokáže pojmout velké množství plniva. Jako plnivo se používaly například písky, šterky, mramorová moučka nebo organická plniva. Výhodou je také jeho zásaditost, která dovoluje využití skelných vláken. Bohužel, zásadní nevýhodou zabráňující širšímu využití hořečnaté maltoviny, je snížená odolnost proti vodě a vlhkosti. Průmyslově je MOC využito například u průmyslových podlah, brusných kotoučů, požárních nebo dekorativní obkladů [11; 12]. Jako hydratační produkt může vzniknout několik krystalických fází, dle chemických rovnic [13]:



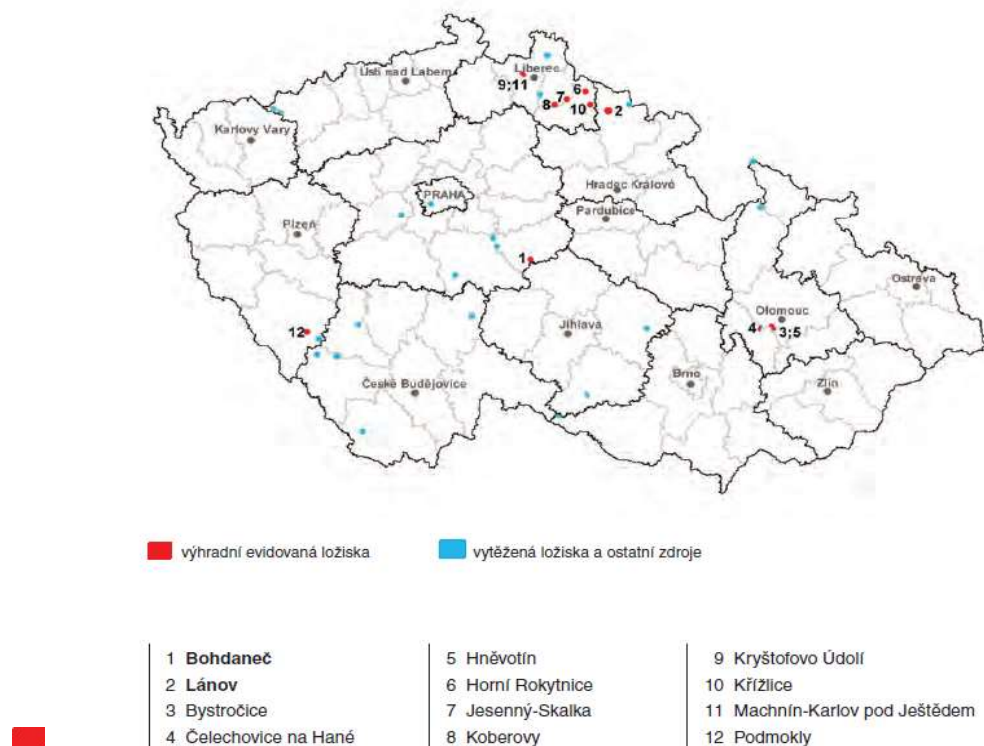


Krystaly fáze 3 a 5 mohou vzniknout při hydrataci za běžné teploty. Tyto krystaly mají v porovnání s krystaly portlandského cementu vyšší tlakovou a ohybovou pevnost. Krystaly fáze 2 a 9 jsou stabilní pouze při okolní teplotě větší než 100°C [13].

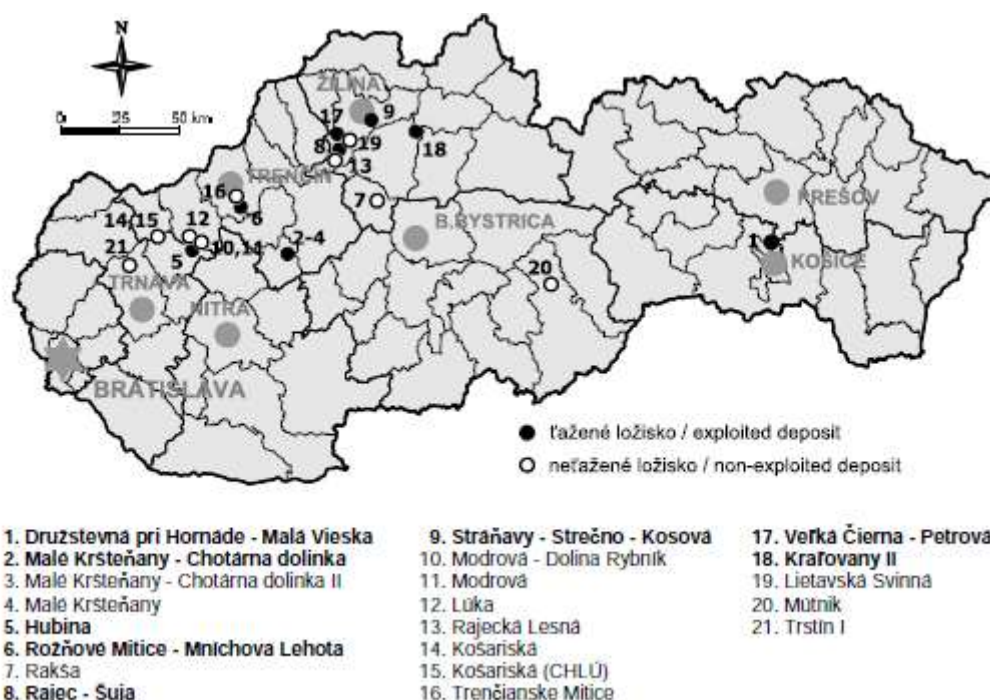
2.1.1 Hlavní suroviny výroby MgO

Hořčík (Mg) se ve velké míře vyskytuje v horninotvorných minerálech, například v dolomitu ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) a magnezitu (MgCO_3), nebo v mořské vodě o koncentraci přibližně 1300 ppm [9]. Z těchto surovin se vyrábí oxid hořečnatý (MgO).

Dolomit je hlavním minerálem stejnojmenné horniny. Vznikl reakcí vápencové usazeniny s rozpuštěným hořčíkem v mořské vodě, nebo na souši, kde horninou pronikaly roztoky s rozpuštěným Mg. Krystaly dolomitu mohou dosáhnout délky až 200 mm [14; 15]. V České Republice bylo v roce 2015 vytěženo 451 ktun dolomitu. Na Obr. 3 je znázorněna mapa ložisek Dolomitu v České Republice. Ložiska v Bohdanči a Lánově jsou těžená [16]. Na Obr. 4 jsou ukázána ložiska dolomitu na Slovensku. Nalézají se zde celkem 21 ložisek, z toho 8 jich bylo v roce 2013 těžených. Bylo zde vytěženo 1215 kilotun dolomitu [17].

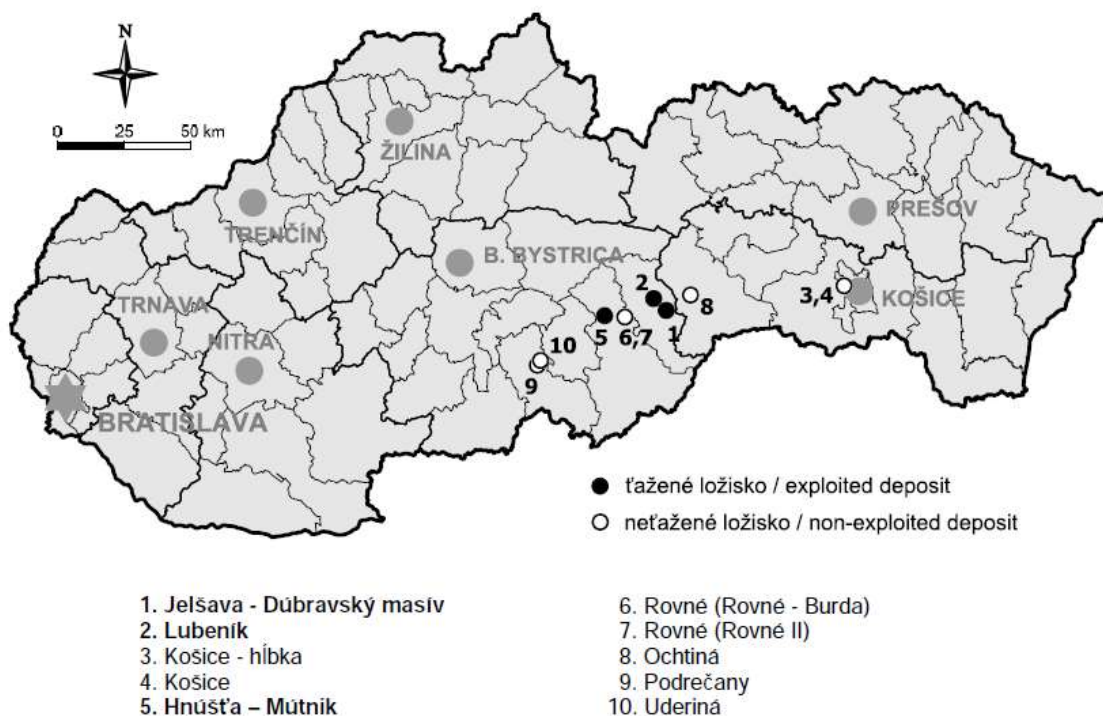


Obr. 3: Evidovaná ložiska dolomitu České republiky [16].



Obr. 4: Mapa evidovaných ložísek dolomitu na území Slovenskej republiky [17].

Magnezit (MgCO_3) je dokonale štěpný minerál, obvykle bílé neprůhledné barvy s rozměry zrn menšími než 10 mm. Ložiska magnezitu jsou vázána na horniny bohaté na hořčík, tedy na dolomity a hadce. Může vznikat působením vody s CO_2 na hadce nebo jako sediment [17]. Magnezit se vyskytuje ve dvou formách, jako kryptokrystalický magnezit a makrokrystalický magnezit [18]. Obsahuje také různé příměsi, například CaO , MnO , SiO_2 , mající vliv na jeho kvalitu a finální vlastnosti. Ložiska magnezitu se nejvíce vyskytují v Číně, Rusku, Turecku, Slovensku a Brazílii [15; 17]. Na Obr. 5 je patrné, že největší současná ložiska magnezitu na Slovensku se nacházejí v okolí Slovenského rudohoří. Z deseti ložísek na Slovensku jsou těžené už pouze tři, v Dúbravském masivu, Lubeníku a Hnúšti [17]. Magnezit má široké využití v keramickém průmyslu, jako obkládací materiál nebo jako zpomalovač hoření [18].



Obr. 5: Mapa evidovaných ložísek magnezitu na území Slovenskej republiky [17].

2.1.2 Výroba a typy MgO

K výrobě oxidu hořečnatého (MgO) se používají dvě metody. První metoda, která je nejvíce používána, je pomocí kalcinace magnezitu a dolomitu za vysoké teploty, podobně jako cement. Čistota kalcinovaného MgO je v rozmezí 75 až 96 %. Mezi hlavní nečistoty patří CaO, Fe₂O₃, Al₂O₃ a SiO₂. Koncentrace těchto nečistot je závislá na výrobních surovinách. Druhá metoda výroby MgO využívá hydropyrolýzu vodní párou o teplotě 1000 °C. Surovinou je nasycený roztok hořčíku nebo mořská voda. Vyrobené MgO je možné následně dále kalcinovat na potřebnou teplotu. Tato metoda je energeticky náročnější, ale vyrobené MgO je z více než 97 % čisté [19; 9].

Vzhledem k teplotě kalcinace se oxid hořečnatý dělí na čtyři typy: lehce pálený MgO, tvrdě pálený MgO, mrtvě pálený MgO a tavený MgO [18]:

- 1) Lehce pálený MgO, jinak nazývaný kaustický magnezit, se vyrábí za teploty 700-1000 °C. To je méně než u portlandského cementu, který kalcinuje při teplotě 1000-1450 °C. Je nejvíce reaktivní a má nejnižší krystalinitu. Kaustický magnezit se používá jako katalyzátor, na výrobu gumy a papíru, jako hnojivo a jako doplněk stravy pro dobytek. Dále se používá jako pohlcovač organických i anorganických kontaminantů, neutralizátor kyselin, filtrační médium a jako pojivo v kompozitních materiálech.

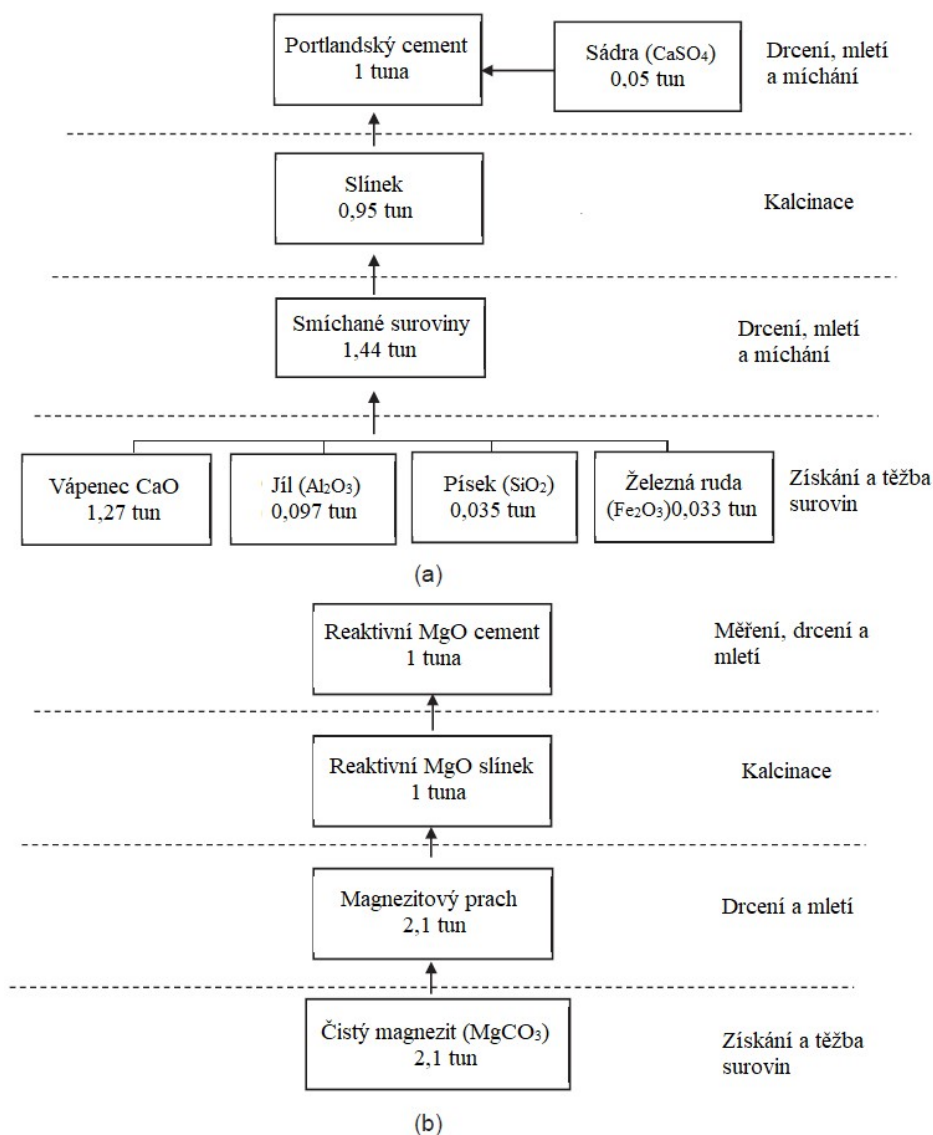
- 2) Tvrdě pálený MgO, vyráběný při teplotě 1000-1400 °C, má nižší reaktivitu a vyšší krystalinitu. Má veliké využití v kompozitních materiálech. Značný význam má v betonech, které se používaly při stavbě betonových přehrad v Číně.
- 3) Mrtvě pálený MgO, vyráběný při teplotě 1400-2000 °C, má nižší reaktivitu a větší krystalinitu než tvrdě pálený MgO. Využívá se při výrobě žáruvzdorných materiálů a cementových kompozitů.
- 4) Tavený MgO se vyrábí za teploty vyšší než 2800 °C. Má nejnižší reaktivitu a nejvyšší krystalinitu. Používá se k výrobě žáruvzdorných elektro-izolačních prvků [18].

2.2 Vliv MgO na životní prostředí v porovnání s portlandským cementem

Přestože má kaustický magnezit nižší teplotu kalcinace, je spotřeba energie a produkce CO₂ při jeho výrobě vyšší než u portlandského cementu. Dle dřívějších studií se na výrobu jedné tuny MgO spotřebuje přibližně 5,9 GJ energie a vyprodukuje se asi 1,7 tun CO₂ (1,1 tun z kalcinace surovin a 0,6 tun spalováním paliva), zatímco u portlandského cementu se spotřebuje 4,5 GJ energie a vznikne 1 tuna CO₂ (0,67 tun kalcinací a 0,33 tun spalováním paliva). Důvodem je větší množství energie použité pro těžbu magnezitu (přibližně 0,06 GJ/MgO proti 0,04 GJ/cement), větší množství surovin potřebných k výrobě (2,08 tun magnezitu proti 1,52 tun surovin cementu) a vyšší pracovní index (16,3 kWh na tunu MgO proti 12,3 kWh na tunu cementu) [18].

Na Obr. 6 je znázorněn diagram produkce portlandského cementu a hořčnatého pojiva. Je zde vidět, že k výrobě jedné tuny MgO je potřeba jediná surovina, tou je MgCO₃, ale přibližně ve dvojnásobném množství. Zatímco na výrobu portlandského cementu (PC) je zapotřebí 4 hlavních surovin.

Ruan a Unluer [18] provedli studii posuzující životní cyklus MOC a PC cementu od těžby surovin po finální produkt a vliv na životní prostředí. Toto LCA (Life Cycle Assessment) bylo vytvořeno pomocí softwarového programu SimaPro 7.0. V LCA studii byl použit nástroj Eco-indicator 99, který rozdělil životní cykly produktů do rozdílných kategorií dle typu dopadu na životní prostředí a následně vyhodnotil. Mezi tyto kategorie patří produkce karcinogenů, dýchacelných organických a anorganických látek, změny klimatu, změna ozonové vrstvy a radiace, které mají vliv na zdraví člověka. Okyselení, eutrofizace, zábor území a ekotoxicita patří mezi kategorie ovlivňující ekosystém. Dále jsou zmíněny zdroje surovin, kam patří minerály a fosilní paliva.



Obr. 6: Diagram výroby 1 tuny portlandského cementu (a) a reaktivního MgO (b) [18].

Jako vstupní data pro výpočet analýzy byla použita data produkce PC v USA a Evropě a data produkce MgO z čínské továrny. Tato samotná data nemohou prezentovat celosvětovou výrobu MgO. Továrny v jiných státech mohou používat jiné suroviny, metody nebo paliva. V Číně se jako základní palivo pro výrobu MgO používá uhlí, zatímco v Evropě se převážně používá zemní plyn, ropná koka nebo palivový olej. Pro analýzu produkce MgO bylo vytvořeno 5 dodatečných scénářů [18]:

- 1) Základní scénář: 100 % spalovaného paliva je uhlí
- 2) Scénář 1: Spalované palivo rozděleno na 30 % benzínu + 70 % uhlí
- 3) Scénář 2: Spalované palivo rozděleno na 30 % svítiplynu + 70 % uhlí
- 4) Scénář 3: Celkové množství surovin zvýšeno o 10 %

- 5) Scénář 4: Celkové množství spotřebované energie zvýšeno o 10 %
- 6) Scénář 5: Celkové množství produkce emisí zvýšeno o 10 %

Výsledky LCA se nacházejí v Tab. 1. Je zde porovnáno zatížení životního prostředí z výroby MOC a PC cementů. Jsou použity nejvyšší hodnoty zatížení vzhledem k jednotlivým scénářům produkce MgO. Největším problémem při výrobě MOC jsou karcinogeny, jejich tvorba je zapříčiněna spalováním velkého množství uhlí při kalcinaci MgO. Na druhou stranu má MOC nízké hodnoty ekotoxicity, poškození ozonové vrstvy radiací, spotřeby fosilních paliv, spotřeby minerálů a acidifikace oproti PC. Nízká hodnota acidifikace je způsobena nízkou teplotou, při které je MgO vyráběno (800 místo 1450 °C). Za této teploty je snížena produkce emisí NO_x a SO₂, které mají významný vliv na acidifikaci. Přesto, že je teplota kalcinace MgO nižší oproti PC, při kalcinaci je vyprodukováno větší množství CO₂ (1,1 proti 0,78-0,83 t/t) [18].

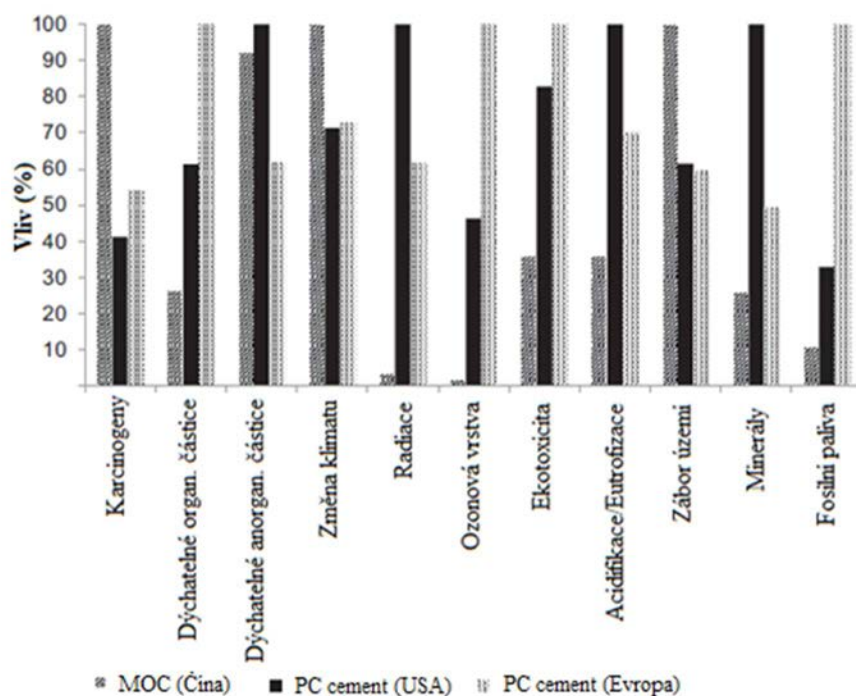
Tab. 1: Vliv MOC a PC produktů na životní prostředí [18].

Kategorie zatížení	Jednotky	MOC (Čína)	PC cement (USA)	PC cement (Evropa)
Karcinogeny	DALY ^a	2,30.10 ⁻⁵	9,47.10 ⁻⁶	1,24.10 ⁻⁵
Dýchatelné organické částice	DALY ^a	8,35.10 ⁻⁸	1,93.10 ⁻⁷	3,15.10 ⁻⁷
Dýchatelné anorganické částice	DALY ^a	5,00.10 ⁻⁴	5,40.10 ⁻⁴	3,30.10 ⁻⁴
Změna klimatu	DALY ^a	2,80.10 ⁻⁴	2,00.10 ⁻⁴	2,10.10 ⁻⁴
Radiace	DALY ^a	3,29.10 ⁻⁸	9,36.10 ⁻⁷	5,76.10 ⁻⁷
Ozonová vrstva	DALY ^a	1,15.10 ⁻⁹	2,98.10 ⁻⁸	6,43.10 ⁻⁸
Ekotoxicita	PAF*m ² *yr ^b	6,24	14,37	17,36
Acidifikace/Eutrofizace	PDF*m ² *yr ^b	7,29	20,21	14,14
Zábor území	PDF*m ² *yr ^b	8,37	5,15	4,98
Minerály	přebytek MJ ^c	0,80	3,09	1,53
Fosilní paliva	přebytek MJ ^c	95,34	283,01	857,23

^a Poškození lidského zdraví spojeno se zkrácením množství dožitých let a ztrátou roků zdravého života vyjádřeno hodnotou DALY (Disability Adjusted Life Years).

^b Poškození ekosystému je vyjádřeno vyhubením živočišného druhu v určité oblasti po určitý čas, vyjádřeno PAF*m²*yr (Potentially Affected Fraction*m²*year) a PDF*m²*yr (Potentially Disappeared Fraction*m²*year).

^c Poškození surovin je vyjádřeno přebytkem energie potřebné k těžbě minerálů a fosilních paliv v budoucnu.



Obr. 7: Grafické porovnání zatížení životního prostředí z produkce MgO a PC [18].

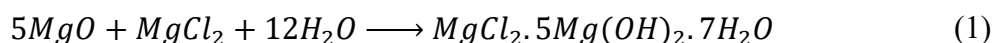
MgO cementy mají stejně jako PC cementy schopnost absorbovat ze vzduchu CO_2 za vzniku karbonátů (uhličitánů). MgO má schopnost absorpce většího množství CO_2 oproti PC, tato vlastnost má zároveň příznivý vliv na pevnost materiálu [19]. Při zohlednění vlivu karbonatace ve výpočtu LCA kleslo množství vyprodukovaného CO_2 na hodnotu 264 kg, o 73 % méně emisí než u PC. MgO cement absorboval více než polovinu emisí CO_2 vzniklých při kalcinaci [18].

Životní cyklus MOC a PC cementu byl na závěr bodově ohodnocen. Bodově ohodnoceny byly jednotlivé kategorie zatížení životního prostředí. U hodnocení platí pravidlo, čím menší bodové skóre, tím menší poškození životního prostředí. Výsledné bodové skóre MOC a PC cementu je suma těchto hodnot. V tomto hodnocení dostalo MgO hodnocení 24,38 bodů. PC v USA a Evropě 28,39 a 36,39 bodů. Z tohoto vyplývá, že celkové zatížení životního prostředí a zatížení zdraví člověka je u životního cyklu MgO o 33 % menší než u PC [18].

2.3 Faktory ovlivňující pevnost kompozitů na bázi kaustického magnezitu

MOC je vyráběna smícháním lehce páleného MgO s roztokem chloridu hořečnatého (MgCl_2). Nejprve se smíchají suché složky kompozitu, mohou být použita anorganická plniva i organická plniva. Dále se připraví roztok MgCl_2 o požadované koncentraci smíchaný s vodou.

Tento roztok se během míchání přidá k suchým složkám kompozitu. Proběhne chemická reakce dle rovnice [10]:



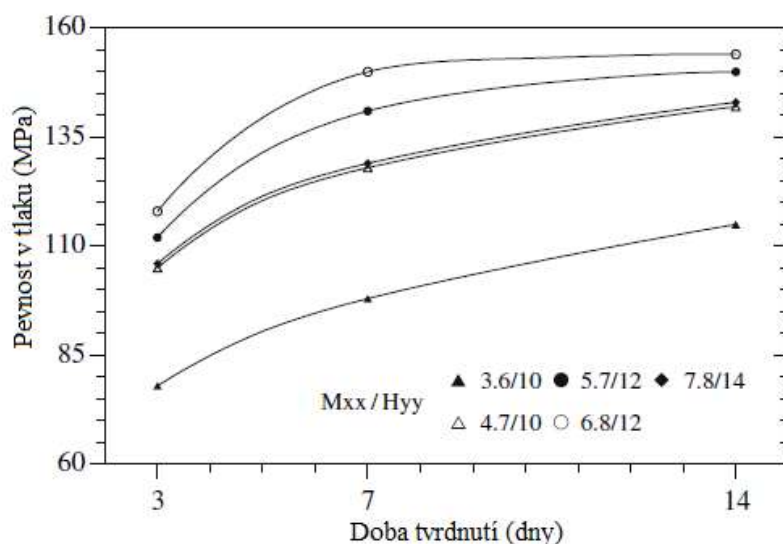
2.3.1 Molární poměr složek

Z dřívějších dob nebylo známo mnoho detailů o tvorbě krystalických fází při výrobě kompozitů na bázi kaustického magnezitu ani jejich cílená tvorba, až do roku 2006. Zkoumalo se, jaký vliv má poměr složek MOC na tvorbu krystalických fází a pevnosti MOC. Pro výzkum byly použity různé molární poměry $MgO/MgCl_2$ a $H_2O/MgCl_2$ jednotlivých zkoušených vzorků. Bylo vyrobeno celkem 21 záměsí s rozdílnými parametry. Poměry těchto záměsí jsou uvedeny v Tab. 2 [12].

Tab. 2: Molární poměry vzorků MOC [12].

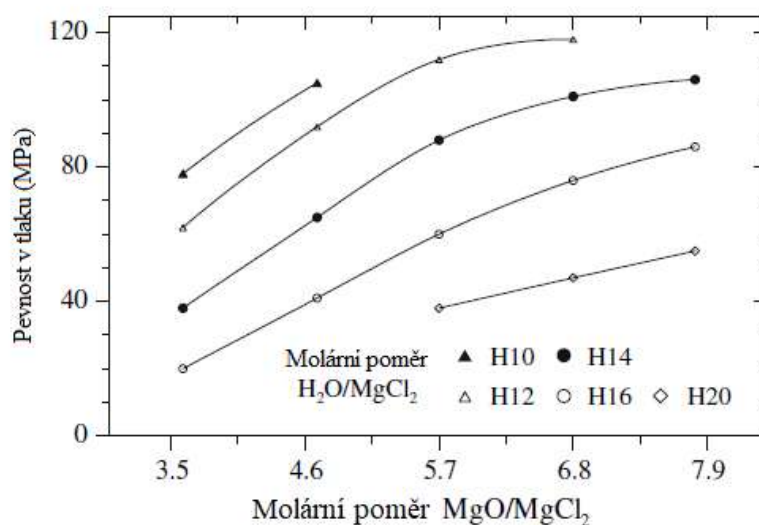
Molární poměr $MgO/MgCl_2$ (M)	Molární poměr $H_2O/MgCl_2$ (H)				
	10	12	14	16	20
3,6	✓	✓	✓	✓	
4,7	✓	✓	✓	✓	
5,7		✓	✓	✓	✓
6,8		✓	✓	✓	✓
7,8			✓	✓	✓

MOC je známé svým rychlým nárůstem pevnosti. To je zapříčiněno pórovitým povrchem MgO , který zajišťuje dostatečný měrný povrch pro chemickou reakci. Na Obr. 8 se nachází graf vývoje pevností v tlaku jednotlivých vzorků po dobu čtrnácti dnů. Vzorky jsou popsány ve formátu M_{xx}/H_{yy} , kde M_{xx} značí molární poměr $MgO/MgCl_2$ a H_{yy} značí poměr $H_2O/MgCl_2$. Nejvyšší pevnost byla zaznamenána u vzorku $M_{6,8}/H_{12}$, který dosáhl po 14 dnech hodnoty 153 MPa. Také má nejvyšší nárůst pevnosti po sedmi dnech, zatímco $M_{3,6}/H_{10}$ má tyto hodnoty nejmenší [12].



Obr. 8: Nárůst pevnosti vzorků MOC po dobu 14 dnů [12].

Na Obr. 9 se nachází porovnání molárních poměrů složek a pevnosti v tlaku po třech dnech. Z obrázku lze vyčíst, že pevnost roste s narůstajícím molárním poměrem MgO/MgCl_2 nebo klesajícím poměrem $\text{H}_2\text{O}/\text{MgCl}_2$. Tyto rozdíly v pevnostech mohou způsobovat rozdílné krystalické fáze jednotlivých vzorků MOC [12].



Obr. 9: Pevnost vzorků MOC po třech dnech [12].

Krystalické fáze jednotlivých vzorků byly analyzovány pomocí rentgenové difrakce (XRD). Bylo zjištěno, že vzorky s konstantním poměrem MgO/MgCl_2 (například M3,6/H10, M3,6/H12, M3,6/H16), mají s vyšším poměrem $\text{H}_2\text{O}/\text{MgCl}_2$ vyšší fázi krystalů. H10 obsahuje krystaly fáze 3, H12 fáze 3 a 5, H16 z velké části krystaly fáze 5 [12].

2.3.2 Koncentrace roztoku MgCl₂

Koncentrace roztoku MgCl₂ se obvykle udává ve stupních hustoty Baumé (°Be). Tuto stupnici zavedl Francouz Antonie Baumé na konci 18. století. Tato metoda předpokládá, že voda má 0 °Be a kyselina sírová s koncentrací 98 % má 66 °Be [20]. K přepočtu koncentrace ze stupně hustoty Baumé na kg/m³ se nejčastěji používá vzorec:

$$kg/m^3 = \frac{144,3}{144,3 - Be} \times 1000 \quad (6)$$

Například pro roztok o hustotě 18 °Be:

$$\frac{144,3}{144,3 - 18} \times 1000 = 1142,5 \text{ kg/m}^3 \quad (7)$$

A. K. Misra a Renu Mathur zkoumali závislost materiálových vlastností vzorků z hořečnaté maltoviny na koncentraci použitého roztoku MgCl₂ a na poměru pojiva a plniva. Byly vytvořeny vzorky o hustotě 20-36 °Be, na kterých byly zjišťovány pevnosti v tlaku σ (MPa) a modul pružnosti E (GPa). Tyto hodnoty jsou znázorněny v Tab. 3 a Tab. 4. Z výsledků je patrné, že pevnosti v tlaku σ vzorků se zvyšují s rostoucí koncentrací roztoku MgCl₂. Modul pružnosti E také roste s rostoucí koncentrací roztoku [21].

Tab. 3: Pevnost v tlaku v závislosti na koncentraci roztoku [21].

Konc. roztoku MgCl ₂ (°Be)	Pevnost v tlaku σ (MPa)					
	1 : 3 (suchá směs)		1 : 4 (suchá směs)		1 : 5 (suchá směs)	
	Doba zrání (dny)					
	7	28	7	28	7	28
20	30,0	40,0	22,8	30,0	10,0	12,8
24	46,0	58,2	30,0	36,0	14,0	17,6
28	61,2	67,0	50,0	56,0	36,8	42,0
32	69,8	72,0	56,0	60,0	39,0	43,0
36	68,6	85,6	64,0	70,0	42,0	44,0

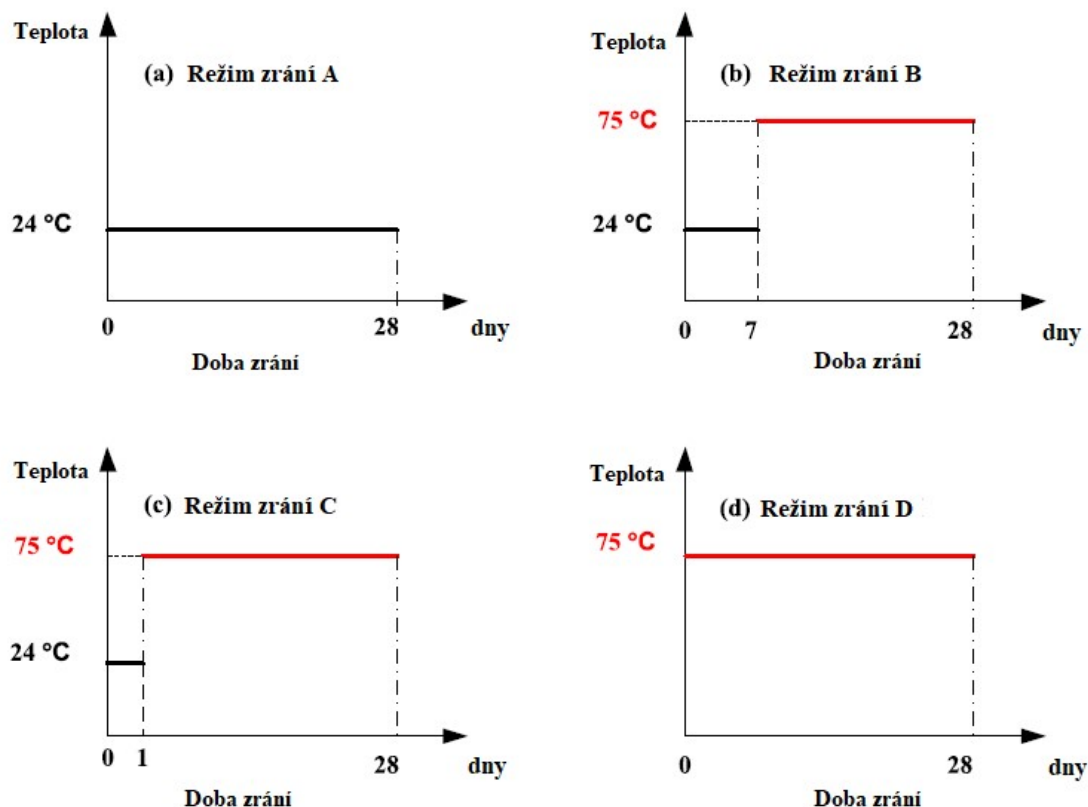
Tab. 4: Modul pružnosti v závislosti na koncentraci roztoku [21].

Suchá směs (MgO:plnivo)	Modul pružnosti E (GPa) Koncentrace roztoku MgCl ₂ (°Be)			
	24	26	28	30
1 : 4,5	53	64	78	85
1 : 6,5	42	55	73	80
1 : 8,5	34	37	56	50
1 : 10,5	28	34	40	45
1 : 12,5	23	27	32	37

2.3.3 Teplotní režim zrání materiálu na bázi MOC

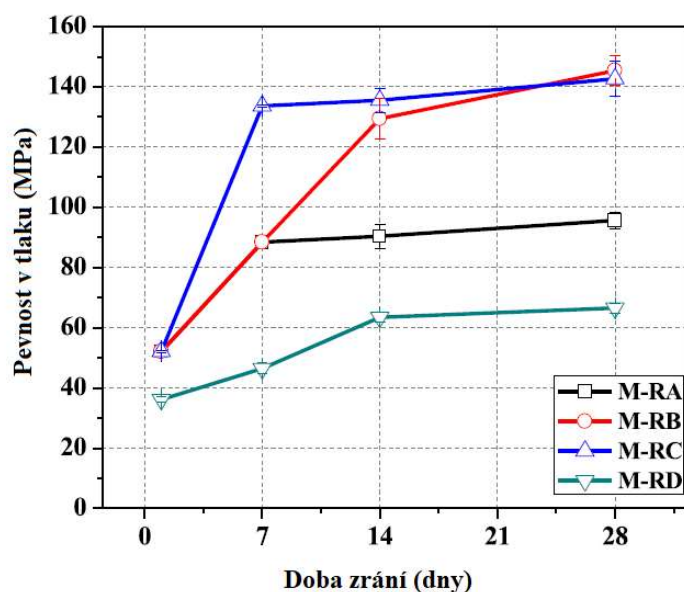
Studie V.M. Sglava a kol. [22] byla zaměřena na vliv teploty, při které materiály na bázi MOC zrají. Bylo zjištěno, že nižší teplota zrání (například 5 nebo 10 °C) zapříčiní horší mechanické vlastnosti materiálu oproti MOC zrajícímu za běžné teploty. Vlivem nízké teploty došlo k nedostatečnému rozpuštění MgO a pomalejšímu růstu krystalů fáze 3. K dehydrataci fáze 3 dochází okolo 80 °C. Vědecké články zmiňují jako kritickou teplotu 75 °C, která ovlivňuje charakteristiky MOC kompozitů. Xu a kol. [23] zkoumali vliv teploty během zrání na vlastnosti vzorků MOC. Tyto vzorky byly vystaveny čtyřem režimům zrání po dobu 28 dní a poté byly zjišťovány jejich pevnosti v tlaku 1., 7., 14. a 28. den viz. Obr. 10:

- Režim A (vzorky M-RA): Vzorky zrající na vzduchu za běžné teploty 24 °C po dobu 28 dnů.
- Režim B (vzorky M-RB): Vzorky zrající na vzduchu za běžné teploty 24 °C po dobu 7 dní, poté zabaleny do potravinářské fólie a uloženy do komory. Zde vzorky dozrávaly za teploty 75 °C zbylých 21 dní.
- Režim C (vzorky M-RC): Vzorky zrající na vzduchu za běžné teploty 24 °C po dobu 24 hodin, poté zabaleny do potravinářské fólie a uloženy do komory. Zde vzorky dozrávali za teploty 75 °C zbylých 27 dní.
- Režim D (vzorky M-RD): Vzorky byly ve formách ihned zabaleny do potravinářské fólie a umístěny do komory, kde zrály při teplotě 75 °C po dobu 28 dní.



Obr. 10: Jednotlivé režimy zrání vzorků MOC [23]

Na Obr. 11 se nachází graf naměřených pevností jednotlivých vzorků MOC. Na grafu je vidět, že vzorky měly největší nárůst pevnosti na počátku zrání. Pevnosti po čtrnácti dnech zrání se hodně přibližují k jejich konečné pevnosti. Dále je patrné, že vzorek M-RD, který byl vystavený po celou dobu zrání zvýšené teplotě, má nejnižší pevnosti. Vzorky M-RB a M-RC mají vyšší pevnosti, než vzorky M-RA zrající za běžné teploty a mnohonásobně vyšší než vzorky M-RD. Je zřejmé, že zvýšení teploty zrání MOC bylo účinné pouze tehdy, když vzorky zrály několik dní za běžné teploty a poté byla teplota zvýšena. Po rentgenové difrakční analýze (XRD) bylo zjištěno, že vzorky M-RA, M-RB a M-RC mohou obsahovat krystaly fáze 5 rozdílných velikostí a M-RD krystaly fáze 3. Velikost krystalů pravděpodobně závisí na rozdílných režimech zrání [23].



Obr. 11: Pevnost v tlaku vzorků MOC jednotlivých režimů zrání [23]

2.4 Polymery

Polymery jsou chemické látky velkého množství rozdílných vlastností. Výrobky z polymerů jsou tuhé, zpracovávají se v měkkém až tekutém stavu. Polymery se dělí na elastomery a plasty. Elastomery jsou vysoce elastické polymery, ty je možné malou silou deformovat bez porušení. Poté se elastomer vrátí do svého původního tvaru. Mezi nejvíce využívaný elastomer patří kaučuk, ze kterého se vyrábí pryž. Plasty jsou za běžných podmínek tvrdé, často i křehké. Za zvýšené teploty se stávají plastickými a lze je tvarovat. Plasty se dělí na termoplasty a reaktoplasty.

Termoplasty mají vratnou změnu mezi plastickým a tuhým stavem. Mezi ně patří například Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polybuten (PB), Polyvinylchlorid (PVC), Polystyren (PS) nebo Polyurethan (PUR). Reaktoplasty mají na druhou stranu změnu mezi pevným a plastickým stavem nevratnou, dochází zde k chemické reakci často probíhající za zvýšené teploty. Mezi reaktoplasty patří například epoxidové pryskyřice nebo polyesterové pryskyřice [24].

2.4.1 Historie plastů

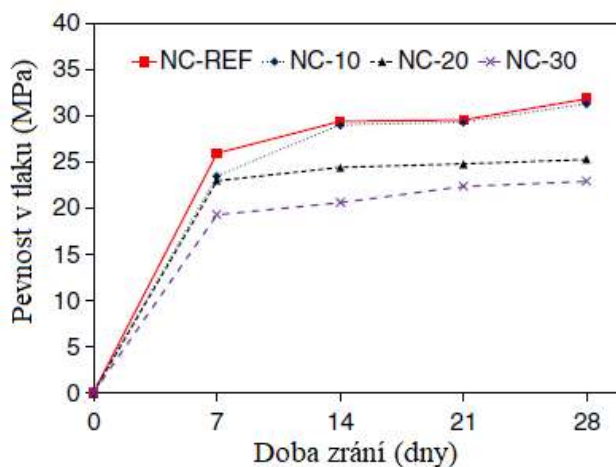
K prvnímu využití plastů došlo s objevením gutaperči. Jedná se o pryskyřici z malajsijských stromů, ze které si místní domorodci vyráběli rukojeti nožů a bičů. Doktor William Montgomerie ji objevil v roce 1843 a poslal do Anglie k vědeckému zkoumání. Fyzik Michael

Faraday zjistil, že je možné využít gutaperču jako izolant elektrického proudu pod vodou. Díky tomuto objevu byla Evropa a Amerika propojena transatlantickým kabelem.

První syntetický plast byl objeven v roce 1935 H.V. Regnaultem, jednalo se o PVC [24].

2.4.2 Zpracování odpadních plastů ve stavebních konstrukcích

Nejběžnější způsob, jak ve stavebním průmyslu zpracovat odpadní plasty, je zakomponování plastu do stavebního kompozitu, kdy písek, případně jiné kamenivo, nahradíme rozdrčeným nebo regranulovaným odpadním plastem. Tuto metodu zkoumal Ozbakkaloglu a kol. [8], který jako náhradu za kamenivo použil PP drcený na velikost 9,5 mm. Byly testovány záměsi běžného a vysokopevnostního betonu s PP s množstvím 10 %, 20 % a 30 % objemu kameniva. Na Obr. 12 jsou uvedeny pevnosti záměsí. Značka NC je pro běžný beton (normal-strength concrete). Čísla určují počet procent PP v záměsí, například značkou NC-20 je značen běžný beton s 20 % PP. Nejvyšší pevnost má u obou typů referenční vzorek, s vyšším množstvím PP pevnost vzorku klesá. To může být způsobeno menším modulem pružnosti E drceného PP a nižší soudržností mezi plochou PP a cementovou pastou [8].



Obr. 12: Pevnost záměsí betonu s plnivem z PP [8].

Další možnou variantou je využití odpadního plastu ve stavebních konstrukcích, které tento plast obsahují v čisté formě. Dissanayake a kol. [3] se zaměřil na stěnové plastbetonové panely obsahující extrudovaný polystyren (EPS). Cílem byla náhrada 50 % použitého EPS za odpadní EPS. Tím se o polovinu zredukuje množství energie použité k výrobě plastu. 50 % množství odpadu je mezní pro pevnost desek.

Tab. 5: Výsledné hodnoty výpočtu potřebné energie [3].

Stavební materiál	Dům z pálených cihel		Dům z betonových bloků		Dům z pěnobetonových panelů tloušťky 100 mm		Dům z pěnobetonových panelů tloušťky 150 mm	
	Hmotnost (kg)	Energie (MJ)	Hmotnost (kg)	Energie (MJ)	Hmotnost (kg)	Energie (MJ)	Hmotnost (kg)	Energie (MJ)
1 Cement	6729	32971	7385	36186	7942	38914	10160	38914
2 Písek	26458	2117	43946	3516	11966	957	12708	1016
3 Hrubé kamenivo	6094	670	6094	670	5073	558	5073	558
4 Cihly	67842	81403	8348	10017	8348	10017	8348	10017
5 EPS (čistý)	0	0	0	0	148	13080	221	19531
6 Ocel	121	5099	121	5099	84	3515	84	3515
7 Keramické dlaždice	1248	11235	1248	11235	1248	11235	1248	11235
8 Barvy	111	16032	111	16032	113	16276	113	16276
9 Tmel	58	306	58	306	58	306	58	306
10 PVC	61	6448	61	6448	61	6448	61	6448
11 Zinková/hliníková folie	628	36280	628	36280	628	36280	628	36280
12 Stavební dřevo	3025	12594	3025	12594	3025	12594	3025	12594
13 Překližka	899	11232	899	11232	899	11232	899	11232
14 Vláknocementové desky	0	0	0	0	2060	15998	2060	15998

Zkoumal se vliv této změny na kompletní množství energie, která je potřeba k těžbě surovin, výrobě konstrukčních prvků, dopravě a stavbě jednopodlažního objektu o velikosti 65 m² z panelů tloušťky 100 a 150 mm. Objekt se porovnával se stejným objektem postaveným z cihel a betonových bloků. Výsledky měření všech prvků jsou v Tab. 5. Výsledná hodnota potřebné energie u 100 mm desky je 366 MJ/m² nebo 545 MJ na jednu desku. Na výrobu 150 mm desky je potřeba 481 MJ/m² nebo 716 MJ na desku.

2.4.3 Expandovaný polypropylen (EPP)

Expandovaný polypropylen (EPP) je jedním z nejvíce používaných pěnových polymerů na světě. Na rozdíl od polypropylenu je zpracovatelný při teplotě 130 °C, má dobré mechanické vlastnosti. Odolává chemickým účinkům a během hoření neprodukuje toxické plyny. EPP je ideálním materiálem například pro výrobu záchrannářského vybavení [25] nebo bezpečnostních prvků interiéru automobilů [26].

2.5 Lněná fermež

Lněná fermež se používá jako ochranná vrstva dřevěných a betonových prvků. Betonové prvky mohou během své funkce nabrat do své pórové struktury vodu případně chemické roztoky. Vlivem nízkých teplot dochází k zamrzání vody v pórech a jejímu rozpínání, čímž dojde k porušení betonu. Fermež vytvoří na povrchu betonu tenkou vrstvu a ucpe jeho póry, tím zamezí pronikání vody a chemických roztoků do pórové struktury. Doporučovalo se ji používat u vodních přehrad, betonových sil nebo na silnice a chodníky. Využití měla také u garážových podlah, kde zamezuje pronikání solných roztoků do podlahy v zimních obdobích [27].

Hlavní surovinou fermeže je lněný olej, který se vyrábí lisováním lněného semene. Olej obsahuje velké množství nenasycených mastných kyselin a je vysýchavý. K dokonalému vyschnutí oleje dojde po několika dnech. Fermež je vyráběna 24-hodinovým varem tohoto oleje. Během varu dochází k oxidaci nenasycených mastných kyselin, to urychluje vysychání [28].

3 Experimentální část

Cílem bakalářské práce bylo vyrobit kompozitní materiál s odpadním plastovým plnivem. Vzhledem k zaměření tématu na životní prostředí, byl pro výrobu kompozitů vybrán Sorelův cement. Sorelův cement je vyráběn za nižší teploty než PC a je schopný pojmout za plnivo vyšší množství organických i anorganických materiálů. Experimentálně bylo vyrobeno několik typů kompozitů použitelných jako vrstva podlah a obsahující plnivo z expandovaného polypropylenu (EPP). Byly sledovány charakteristické vlastnosti jednotlivých materiálů, jejich objemová a měrná hmotnost, pevnostní vlastnosti, tepelně technické a vlhkostní vlastnosti.

3.1 Použité materiály pro výrobu kompozitů

Hlavními surovinami pro výrobu hořečnaté maltoviny byl oxid hořečnatý (MgO) a roztok chloridu hořečnatého ($MgCl_2$). Jako plnivo byl použit normový křemenný písek a expandovaný polypropylen (EPP). V této práci byl jako hořečnaté pojivo použit STYROMAG DF80F Štýrské firmy Styromag. Specifikace a porovnání MgO s požadavky normy ČSN EN 14016-1 [29] je v Tab. 6. K výrobě roztoku chloridu hořečnatého byl použit hexahydrát chloridu

hořečnatého v čistotě pro chemickou analýzu ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ p.a.), který splňuje všechny podmínky dle normy ČSN EN 14016-1 [29].

Tab. 6: Požadované parametry kaustického magnezitu

Parametr	Použitý MgO	Požadavky normy ČSN EN 14016-1
Ztráta žiháním 1050°C/1 h	2,9 %	< 8 %
Zbytek nerozpustný v kyselině chlorovodíkové	4,0 %	
SiO₂	3,0 %	
CaO	5,1 %	<4% (neplatí pokud je množství volného CaO menší než 1 % hmotnosti)
volné CaO	0,6 %	
MgO total	85,0 %	> 80 %
Mg	51,3 %	
Sypná hmotnost volně sypaná	843,03 kg/m ³	<1000 kg/m ³
Sypná hmotnost setřesená	1059,97 kg/m ³	
Hustota matrice	3344.16 kg/m ³	
Měrný povrch podle Blaina	690 m ² /kg	

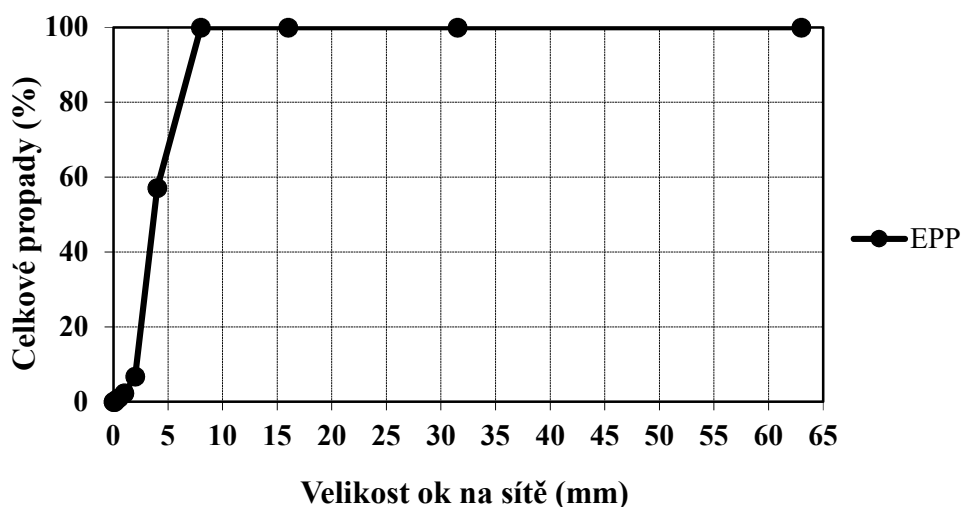
Jako plnivo referenčních vzorků byl použit normový písek společnosti Filtrační písky, a. s., závod Chlum u Doks. Byly použity frakce PG1 (0.06 3/0.5 mm), PG2 (0.08/1 mm) a PG3 (1/2 mm). Frakce písku byly smíchány v hmotnostním poměru 1:1:1 na písek frakce 0-2 mm.



Obr. 13: Plnivo použité k výrobě – normalizovaný písek (vlevo), odpadní EPP (vpravo).

Jako náhrada písku u zkoumaných vzorků byl v této práci použit plastový odpad od společnosti Flyteam ze Slovenska. Jedná se o nadrcený odpadní expandovaný polypropylen (EPP), který vznikl při výrobě modelů letadel. EPP byl vybrán vzhledem ke svým tepelně

technickým vlastnostem. Dle zrnitostí křivky (Obr. 14) jsou zrna EPP menší než 8 mm, tudíž jsou vhodná jako náhrada za písek u kompozitů.



Obr. 14: Zrnitostní křivka EPP

Jako látky pro vnitřní hydrofobizaci byly použity stearan vápenatý a oleát sodný, oba produkty byly dodány firmou Excel Mix.

3.2 Příprava vzorků

Výroba vzorků hořečnaté maltoviny probíhala dle normy ČSN EN 14016-2 [30]. Tato norma popisuje výrobu hořečnaté maltoviny s písečným pojivem. Některé postupy, jako například postup míchání směsi, musely být pozměněny vzhledem k použití EPP jako náhradního plniva. Norma počítá se záměsí na 3 zkušební tělesa složenou ze 450 g hořečnatého pojiva, 1350 g normalizovaného písku a 500 g roztoku $MgCl_2$ o hustotě 26 °Be. K přepočtu koncentrace roztoku byl použit vzorec:

$$kg/m^3 = \frac{144,3}{144,3 - Be} \times 1000 \quad (6)$$

Výsledná hodnota koncentrace je:

$$\frac{144,3}{144,3 - 26} \times 1000 = 1219,8 \, kg/m^3 \quad (8)$$

Norma [29] počítá s maltovinou obsahující písek, podle pracovního postup se nejprve smíchá MgO s roztokem $MgCl_2$ a během míchání se přidá plnivo. Při tomto postupu by nedošlo k dostatečnému promíchání EPP plniva s maltovinou. Z tohoto důvodu byl pracovní postup upraven. Nejprve byly míchány všechny suché složky a poté byl přidán roztok $MgCl_2$.

Pro měření vlastností kompozitů obsahujících EPP byli vyrobeny tyto typy vzorků:

1. Referenční směs: značka HP REF, jako plnivo je použit normalizovaný písek.
2. Plastová směs: značka HPP 150, plnivo je objemově nahrazeno 150 % EPP.
3. Plastová směs s hydrofobizátorem: značka HPP SO, plastová směs + hydrofobizátory, stearan vápenatý a oleát sodný.



Obr. 15: Zkušební tělesa - HP REF (nalevo), HPP 150 (napravo).

Receptury jednotlivých směsí jsou v Tab. 7. Z těchto směsí byly vyrobeny zkušební trávce o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, kostky o rozměrech 70 x 70 x 70 mm a kolečka s průměrem 110 mm a výškou 20 mm. Vzorky byly následující den odbedněny a dále zrály na vzduchu o teplotě 21 °C a relativní vlhkosti 45 % po dobu dalších 27 dní. Část měřených zkušebních těles byla natřena lněnou fermeží, která může mít vliv na výsledné difuzní a sorpční vlastnosti materiálu. Tato tělesa jsou označena popisem směsi s přídatkem LO, například HPP 150 LO.

Tab. 7: Receptura směsí hořečnaté maltoviny

Vzorek	m (g)						
	Kaustický magnezit	MgCl ₂ .6H ₂ O	Voda	Písek	EPP	Stearan	Oleát
HP Ref	450	273,1	226,9	1350	-	-	-
HPP 150	450	273,1	226,9	-	14,5	-	-
HPP SO	450	273,1	226,9	-	14,5	4,5	9

3.3 Použité metody měření

3.3.1 Zkouška rozlíváním

Rozliv hořečnatých maltových směsí byl měřen ihned po vyrobení jednotlivých směsí dle normy ČSN EN 12350-5 [31] na rozlivovém stolku. Na horní desce se naplnila kovová forma

ve tvaru komolého kužele a nekorodující s maltovinou. Forma se naplnila ve dvou vrstvách, které byly 10x zhutněny dusadlem. Po 30 sekundách se forma opatrně zvedla. Horní deska se pomocí kliky 15x zvedla a nechala volně dopadnout na zarážku. Nakonec se pomocí pravítka změřila délka rozměr rozlité maltoviny ve dvou na sebe kolmých směrech.



Obr. 16: Zkouška rozlitím směsi HPP 150.

3.3.2 Doba tuhnutí

Doba tuhnutí byla stanovena na kaši z hořčnaté maltoviny bez přidaného plniva ve stejném poměru jako u zkušebních těles dle normy ČSN EN 14016-2 [30]. Byl použit automatický Vicatův přístroj se skleněnou destičkou a ocelovou jehlou válcového tvaru o délce 50 mm a průměru 1,13 mm. Byla namíchána kaše z hořčnaté maltoviny dle stejného pracovního postupu jako při přípravě zkušebních vzorků. Kaši se naplnil Vicatův prstenec a položil se na skleněnou desku přístroje. Jehla se nastavila tak, aby se dotýkala hořčnaté kaše. Jehla se po uvolnění ponořila do kaše, v této poloze zůstala 15 sekund a poté se pomalu zvedla do původní polohy. Interval vnikání jehly byl nastaven na 10 minut. Vzdálenost mezi koncem jehly a skleněnou destičkou byla zaznamenávána automaticky na záznamový list. Čas počátku tuhnutí je určen od počátku míchání do doby, kdy byla jehla zastavena ve vzdálenosti 4 ± 1 mm od skleněné destičky. Konce tuhnutí byl stanoven časem od počátku míchání do doby, kdy se jehla zastavila v kaši do hloubky 1 mm.

3.3.3 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost ρ_v (kg/m^3), byla změřena na zkušebních trámčích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, vysušených na ustálenou hmotnost. Vzorky byly měřeny digitálním posuvným

měřátkem a zváženy s přesností na dvě desetinná místa. Objemová hmotnost byla vypočítána dle vzorce:

$$\rho_v = \frac{m}{V} \quad (9)$$

kde

m je hmotnost vysušeného vzorku (kg)

V je objem vzorku získaný výpočtem (m³)



Obr. 17: Zkušební trámec HPP 150.

3.3.4 Hustota matrice

Hustota matrice ρ_{mat} (kg/m³), neboli měrná hmotnost, byla měřena na automatickém héliovém pyknometru ATC (Thermo-Scientific) s plně integrovaným řízením teploty s přesností na $\pm 0,01$ °C. Vzorky byly vysušeny do ustálené hmotnosti, poté zváženy s přesností na pět desetinných míst a vloženy do přístroje. Heliový pyknometr změřil hustotu matrice ρ_{mat} v g/cm³ na pět desetinných míst.



Obr. 18: Heliový pyknometr.

3.3.5 Pórovitost

Pórovitost ψ (-, %) udává objem pórů v materiálu. Spočítá se dle vzorce:

$$\psi = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_{mat}} \quad (10)$$

kde

ρ_v je objemová hmotnost vzorku (kg/m^3)

ρ_{mat} je hustota matrice vzorku (kg/m^3)

3.3.6 Dynamický modul pružnosti

Youngův modul pružnosti E (GPa) byl měřen na zkušebních trámcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, vysušených na ustálenou hmotnost. Byla použita pulzní ultrazvuková metoda. Principem metody je měření mechanických kmitů v materiálu a doby průchodu ultrazvukové vlny vzorkem v podélném směru trámců. K měření byl použit přístroj DIO 562 (Starmans Electronics) pracující na frekvenci 50 Hz.

Dynamický modul pružnosti E vypočítá dle rovnic:

$$E = \frac{m}{a \cdot b \cdot c} \cdot v^2 \quad (11)$$

$$v = \frac{a}{t} \quad (12)$$

kde

m je hmotnost vysušeného vzorku (kg)

a je podélný rozměr vzorku (m)

b, c jsou výška a šířka vzorku (m)

v je rychlost průchodu ultrazvukové vlny vzorkem (m/s)

t je čas průchodu ultrazvukové vlny vzorkem (s)

3.3.7 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu f_{cf} (MPa) byla měřena pomocí hydraulického lisu dle normy EN 196-1 [32]. Zkušební trávce o rozměrech 40 x 40 x 160 mm byly rovnoměrně zatěžovány pomocí zatěžovacího zařízení s jedním břemenem uprostřed. Byla změřena maximální hodnota síly F při porušení zkušebního tělesa. Referenční vzorky byly měřeny po 3, 7, 14 a 28 dnech zrání. Vzorky s plnivem z EPP po 3, a 28 dnech zrání. Pevnost vzorku v tahu za ohybu f_{cf} (MPa) byla spočítána ze vzorce:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (13)$$

kde

F je maximální síla zatížení při porušení (N)

l je vzdálenost mezi podpěrnými válečky (mm)

d_1 (šířka), d_2 (výška) rozměry tělesa v příčném směru (mm)

3.3.8 Pevnost v tlaku

Pevnost tlaku f_c (MPa) byla měřena na hydraulickém lisu dle normy EN 196-1 [32]. Měřeny byly úlomky zkušebních trámců použitých při měření pevnosti v tahu za ohybu. Zkušební těleso bylo konstantní rychlostí zatěžováno na boční hranu ve směru plnění výrobních forem a zatěhuje se do úplného porušení prvku. Rozhodující je síla zatížení při porušení F (N). Pevnost v tlaku f_c (MPa) byla vypočítána dle rovnice:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (14)$$

kde

F je maximální síla zatížení při porušení (N)

A_c je plocha vzorku, na kterou působí zatížení (mm²)

3.3.9 Tepelně-technické vlastnosti

K měření tepelných vlastností materiálů byl použit přístroj ISOMET 2114. Jedná se o přístroj určený k přímému měření součinitele tepelné vodivosti λ (W/m.K), měrné tepelné kapacity c_v (J/m³.K), součinitele teplotní vodivosti a (m²/s) a teploty kompaktních sypkých a kapalných materiálů pomocí výměnných jehlových sond pro měření sypkých materiálů a plochých sond pro měření zkušebních těles. Měřeny byly zkušební kostky o rozměrech 70 x 70 x 70 mm bez nátěru lněnou fermeží a část kostek s nátěrem. Přesnost měření přístroje udává Tab. 8.

Tab. 8: Přesnost měření přístroje ISOMET 2114

Měření	Rozsah měření	Přesnost
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,015 – 0,70 W/m.K	5 % čtení + 0,001 W/m.K
	0,7 – 6,0 W/m.K	10 % čtení
Měrná objemová tepelná kapacita C_v	$4,0 \cdot 10^4 - 4,0 \cdot 10^6$ J/m ³ .K	15 % čtení + $1 \cdot 10^3$ J/m ³ .K

Předpokládáme, že by materiál mohl být použit jako roznášecí vrstva podlahy. Proto byl dále spočítán tepelný odpor R (m².K/W) a součinitel prostupu tepla U (W/m².K) na vrstvě podlahy o tloušťce 100 mm. Tepelný odpor R (m².K/W) byl vypočten z rovnice:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (15)$$

kde

d je tloušťka vrstvy podlahy (m), v našem případě 0,1 m

λ je součinitel tepelné vodivosti (W/m.K)

Z této hodnoty byl vypočten součinitel prostupu tepla podle vzorce:

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \quad (16)$$

kde

R je tepelný odpor vrstvy podlahy (m².K/W)

R_{si} je tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru, jeho hodnota je 0,017 (m².K/W)

R_{se} je tepelný odpor při přestupu tepla v exteriéru, jeho hodnota je 0,04 (m².K/W)

3.3.10 Měření transportu vodní páry miskovou metodou bez teplotního spádu

Transport vodní páry je popsán těmito veličinami: součinitel difúzní vodivosti δ (s), součinitel difúze vodní páry D (m²/s) a faktor difúzního odporu μ (-). Měření probíhalo dle normy ČSN EN ISO 12572 [33]. Je založeno na jednorozměrném šíření vodní páry vzorkem. Byl zjišťován vlhkostní tok vodní páry prošlý vzorkem. Na jedné sadě zkušebních těles každé směsi byl aplikován nátěr lněnou fermeží, aby bylo možné zkoumat jeho vliv na transport vodní páry. Vzorky byly po obvodu zaizolovány epoxidovou pryskyřicí, umístěny do kovových nekorodujících misek a vzduchotěsně upevněny. Misky byly naplněny vysušeným silikagelem simulujícím suché prostředí (2 % relativní vlhkosti). Vzorky byly následně umístěny do klimatické komory o vnitřní teplotě 21 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 %. U vzorků byl

periodicky vážen nárůst hmotnosti jednotlivých misek s přesností na dvě desetinná místa. Zjištěné přírůstky hmotnosti jednotlivých vzorků v závislosti na době vážení byly vynášeny do grafu. Jakmile tato hmotností křivka dosáhla přímkového charakteru, bylo měření považováno za ukončené.

Součinitel difuzní vodivosti δ (s) byl vypočítán dle rovnice:

$$\delta = \frac{\Delta m \cdot d}{S \cdot \tau \cdot \Delta p_p} \quad (17)$$

kde

Δm je množství vodní páry prošlé vzorkem (kg)

d je tloušťka vzorku (m)

S je měrná plocha vzorku (m²)

τ je časové období korespondující s transportem vodní páry Δm (s)

Δp_p je rozdíl parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu nad a pod měrným povrchem vzorku (Pa), je vypočítán z tabelovaných hodnot pro příslušnou teplotu a vlhkost

Součinitel difúze vodní páry D (m²/s) byl vypočítán dle rovnice:

$$D = \frac{\delta \cdot R \cdot T}{M} \quad (18)$$

kde

δ je součinitel difuzní vodivosti (s)

R je univerzální plynová konstanta, její hodnota se rovná 8,314 (J/mol.K)

T je teplota (K)

M molární hmotnost vody, její hodnota je 0,018 (kg/mol)

Faktor difúzního odporu μ (-) byl vypočítán dle rovnice:

$$\mu = \frac{D_a}{D} \quad (19)$$

kde

D_a je součinitel difúze vodní páry ve vzduchu, jeho hodnota je $2,3 \cdot 10^{-5}$ (m²/s)

D je součinitel difúze vodní páry vzorku (m²/s)

3.3.11 Transport kapaln  vody metodou vertik ln  nasákavosti

Vertik ln  nasákavost byla měřena dle ČSN EN 1015-18 [34] na kostkách o rozměrech 70 x 70 x 70 mm. Zkouman  vzorky HPP REF a HPP 150 byly opatřeny nátěrem lněnou fermeř , aby byl sniřen prostup vodní páry do materiálu. Vzorky HPP SO j ř obsahují hydrofobiz tory, a nejsou tedy lněnou fermeř  opatřeny. Zkuřebn  kostky byly ze čtyř stran zaizolovány epoxidovou pryskyřicí, aby byl zajiřten jednorozm rn  transport vlhkosti. Vzorky byly zvířeny za sucha a poté manu ln  namáčeny nezaizolovanou stranou do vody o hloubce 1-2 mm v předepsaných časových intervalech po dobu 30 minut. Z tohoto měření byl pro kařd  vzorek sestaven graf závislosti kumulativního obsahu vody v materiálu (kg/m^2) na odmocnině času ($\text{s}^{1/2}$). Z p  mkov  počáteční závislosti tohoto grafu byl určen absorpční koeficient A ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$). Po nam čec ch cyklech byly vzorky ulořeny do vody pro zjiřten  hmotnosti odpovídající kapilární nasákavosti. U vzorků dořlo po dvou dnech měření k objemov m zm n m a vlivem napětí mezi vlastním vzorkem a epoxidovou vrstvou dořlo k ke vzniku trhlin. Z tohoto důvodu byly měřeny pouze absorpční koeficient vody A ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$) a sorptivita S ($\text{m/s}^{1/2}$).



Obr. 19: Vzorky HP REF (nalevo) a HPP 150 (napravo) po ulořen  ve vodě.

Sorptivita S ($\text{m/s}^{1/2}$) byla vypo t na pomocí vzorce:

$$S = \frac{A}{\rho_l} \quad (20)$$

kde

A je absorpční koeficient vzorku ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$)

ρ_l je hustota vody (kg/m^3)

3.4 Výsledky měření a diskuse

3.4.1 Rozliv hořčnaté maltoviny

Tab. 9: Rozliv směsí hořčnaté maltoviny.

Značka	Plnivo	Frakce	Objem náhrady	Rozliv
HP REF	Písek	0-2 mm	750 ml	20,0x20,5 cm
HPP 150	EPP	0-8 mm	1100 ml	13,5x14,0 cm
HPP SO	EPP	0-8 mm	1100 ml	13,0x13,0 cm

V Tab. 9 se nacházejí rozměry rozlití jednotlivých směsí. Na velikost rozlití má zásadní vliv množství a velikost plniva. Směs s EPP s vyšším objemem plniva a vyšší frakcí měla znatelně menší rozlití oproti směsi s písečným plnivem. Protože je hodnota rozlivu HPP 150 a HPP SO přibližně stejná, neměla přísada hydrofobizačních látek na rozliv žádný vliv.

3.4.2 Doba tuhnutí

Počátek doby tuhnutí maltové kaše byl stanoven na 520 minut (8,7 hodin) od počátku míchání a konec tuhnutí po 755 minutách (12,6 hodinách). Tyto hodnoty nemohou souhlasit s hodnotami v normě ČSN EN 14016-2 [30]. V této normě je použit poměr složek s nižším vodním součinitelem. Poměr složek měřené kaše byl stejný jako při výrobě zkušebních těles.

3.4.3 Základní materiálové vlastnosti

Tab. 10: Základní materiálové charakteristiky směsí hořčnatých maltovin.

Značka	ρ_v (kg/m ³)	ρ_{mat} (kg/m ³)	ψ (%)
HP REF	2076	2401	13,5
HPP 150	905	1421	36,4
HPP SO	926	1413	34,5

V Tab. 10 nalezneme objemovou hmotnost, hustotu matrice a pórovitost jednotlivých směsí hořčnaté maltoviny po 28 dnech zrání. Referenční směs se svými charakteristikami blíží k cementovému prostému betonu, $\rho_v = 2100 \text{ kg/m}^3$ [35]. Směsi obsahující plnivo z EPP mají objemovou hmotnost podobnou lehčenému keramzit-betonu, $\rho_v = 900 \text{ kg/m}^3$ [35]. Obsah hydrofobizátorů ve směsi neměl na tyto charakteristiky téměř žádný vliv.

3.4.4 Mechanické vlastnosti

Tab. 11: Pevnosti směsi HP REF po 3, 7, 14, a 28 dnech zrání.

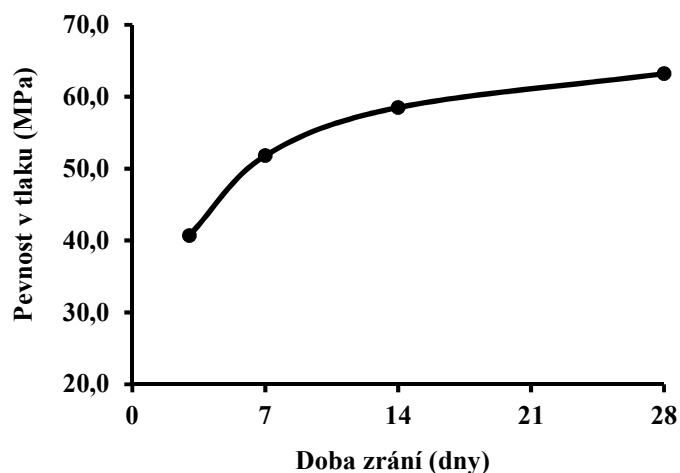
Značka	ρ_v (kg/m ³)	f_{cf} (MPa)	f_c (MPa)
HP REF 3d	2100	11,9	40,7
HP REF 7d	2104	11,9	51,8
HP REF 14d	2125	13,8	58,5
HP REF 28d	2137	19,3	63,2

Tab. 12: Pevnostní charakteristiky jednotlivých směsí po 28 dnech zrání.

Vzorek	ρ_v (kg/m ³)	f_{cf} (MPa)	f_c (MPa)	E (GPa)
HP REF	2076	19,3	63,2	36,6
HPP 150	905	4,8	6,3	1,7
HPP SO	926	3,0	7,6	3,1

Referenční směs byla měřena 4x po dobu zrání. Hodnoty naměřených pevností se nacházejí v Tab. 11. Například třídení pevnost je označena 3d nebo sedmidenní pevnost 7d. Nárůst pevnosti v tlaku f_c (MPa) je zobrazen na Obr. 20.

K největšímu nárůstu pevnosti došlo po 3 dnech zrání maltoviny na hodnotu 40,7 MPa, to je přibližně 64 % pevnosti v tlaku po 28 dnech, 63,2 MPa. Pevnost po 28 dnech je srovnatelná s nejvyšší třídou běžného betonu C 50/60. Norma ČSN EN 14016-1 [29] předepisuje požadovanou hodnotu 60 MPa. Referenční směs této podmínce vyhovuje. Porovnání pevnostních charakteristik všech zkoumaných směsí je v Tab. 12.



Obr. 20: Nárůst pevnosti v tlaku f_c (MPa) směsi HP REF.

Dle předpokladu, mají směsi obsahující plnivo z EPP značně nižší pevnosti než referenční směs s plnivem z písku. Pevnost v tahu za ohybu směsi HPP 150 je o 75 % nižší než HPP REF. Pevnost HPP SO je dokonce o 84 % nižší. Pokles pevnosti tlaku je o 90 % u HPP 150 a 88 % u HPP SO nižší.

3.4.5 Tepelně-technické vlastnosti

Tab. 13: Tepelně technické vlastnosti hořečnatých směsí.

Vzorek	ρ_v (kg/m ³)	ψ (-)	λ (W/m.K)	c_v (10 ⁶ J/m ³ .K)	R (m ² .K/W)	U (W/m ² .K)
HP REF	2076	13,5	2,829	1,950	0,035	4,076
HP REF LO			2,894	1,977	0,035	4,089
HPP 150	905	36,4	0,399	1,606	0,251	2,171
HPP 150 LO			0,422	1,617	0,237	2,237
HPP SO	926	34,5	0,387	1,615	0,258	2,136

Výsledné tepelné vlastnosti a vypočtené vlastnosti konstrukce podlahy o tloušťce 100 mm jsou napsány v Tab. 13. Náhrada plniva odpadním plastem a vyšší pórovitost snížily součinitel tepelné vodivosti o 86 % oproti referenční směsi. Referenční směs jsme porovnali se směsí běžného betonu stejné objemové hmotnosti dle normy ČSN 730540-3 [35]. Beton má hodnotu $\lambda = 1,05$ W/(m.K), referenční směs má tedy o 69 % vyšší tepelnou vodivost. Při výpočtu součinitele prostupu tepla U podlahy o tloušťce 100 mm by lépe vyhověl prostý beton s hodnotou $U = 3,276$ m².K/W. Maltovinu obsahující plnivo z odpadního EPP lze dle objemové hmotnosti porovnat s lehčenými betony s pórovitým kamenivem, například Liapor beton. Dle normy má Liapor beton hodnotu λ 0,3 W/(m.K). Liapor beton má tepelnou vodivost oproti směsím s EPP o 15 % nižší.

3.4.6 Transport vodní páry

Tab. 14: Difuzní vlastnosti směsí hořčnaté maltoviny.

Vzorek	ρ_v (kg/m ³)	ψ (%)	δ (10 ⁻¹² s)	D (10 ⁻⁷ m ² /s)	μ (-)
HP REF	2076	13,5	4,019	5,460	46,0
HP REF LO			2,311	3,140	78,9
HPP 150	905	36,4	4,448	6,043	41,1
HPP 150 LO			4,272	5,804	42,7
HPP SO	926	34,5	5,622	7,545	33,5

Výsledné hodnoty popisující difuzní vlastnosti materiálu jsou v Tab. 14. Při porovnání směsí bez hydrofobizace vyšel součinitel difuzní vodivosti směsi HPP 150 o 10 % vyšší oproti referenční maltovině. Hydrofobizace lněnou fermeží měla největší vliv na referenční směs, zde snížila difuzní vodivost až o 43 %, u HPP 150 s vyšší pórovitostí pouze o 4 %. Difuzní vodivost směsi HPP SO s vnitřní hydrofobizací vyšla o 32 % vyšší, než směsi bez vnitřní hydrofobizace s nátěrem lněnou fermeží.

3.4.7 Transport kapalné vody

Tab. 15: Sorpční vlastnosti směsí.

Vzorek	ρ_v (kg/m ³)	ψ (%)	A kg/m ² s ^{1/2}	S m/s ^{1/2}
HP REF LO	2076	13,5	0,0002	2,004.10 ⁻⁷
HPP 150 LO	905	36,4	0,0007	6,513.10 ⁻⁷
HPP SO	926	34,5	0,0014	1,352.10 ⁻⁶

Výsledné naměřené hodnoty sorpčních vlastností vidíme v Tab. 15. Zvyšující se pórovitost směsí má za následek vyšší hodnotu absorpčního koeficientu a sorptivity. Referenční směs má ze všech zkoumaných směsí nejnižší nasákavost. Směs obsahující plast má absorpční koeficient více než 3x vyšší. Porovnáme-li směsi obsahující odpadní plast, vyjde nasákavost směsi s vnitřní hydrofobizací 2x vyšší než nasákavost směsi opatřené hydrofobizačním nátěrem.

4 Závěr

V této práci byly měřeny vlastnosti hořčnaté maltoviny obsahující plnivo z odpadního expandovaného polypropylenu. Byly měřeny základní, pevnostní a tepelně-technické vlastnosti a odolnost proti vodě. Dále byl zkoumán vliv hydrofobizace na měřené vlastnosti. Z měření se došlo k tomuto závěru:

- a) Referenční hořčnatou maltovinu obsahující normalizovaný písek lze svými základními a pevnostními vlastnostmi přirovnat k běžnému betonu třídy C 50/60. S nižší teplotou kalcinace a větší šetrnosti k životnímu prostředí se jedná o vhodnou náhradu běžného betonu.
- b) Objemová hmotnost byla s použitím 150 % náhrady odpadním EPP snížena o 56 %. Současně s použitím odpadního EPP vzrostla pórovitost.
- c) Směs maltovin s odpadním EPP dosáhla tepelně technických vlastností lehčeného betonu, ale s nižšími pevnostmi. To z ní dělá vhodný materiál například do podlah objektů s nízkým zatížením. Zlepšení pevnostních charakteristik by mohlo být předmětem dalšího zkoumání.
- d) Vnější hydrofobizace lněnou fermeží omezila transport kapalně i vzdušné vlhkosti více než vnitřní hydrofobizace stearamem vápenatým a oleátem sodným. Na transport měla vliv také pórovitost materiálu. Hydrofobizace ovlivnila nejvíce referenční směs s nízkou pórovitostí.

Odpadní expandovaný polypropylen je možné použít jako plnivo hořčnaté maltoviny. Výsledný produkt má vhodné tepelně izolační vlastnosti a lze z něj vyrábět tepelně izolační podlahy, stropní nebo stěnové panely snižující energetickou náročnost budov. Zároveň méně zatěžuje životní prostředí během svého životního cyklu. Při aplikaci materiálu se musí brát v úvahu jeho nízké mechanické vlastnosti a odolnost vůči vodě a vlhkosti, proti kterým musí být materiál chráněn.

5 Literatura

- [1] BERARDI, U. A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. *Resources, Conservation and Recycling*. 2016, **2017**(123), 230-241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.014>. ISSN 09213449.
- [2] IEA: IEA assists UN climate talks by providing summary of emissions data. In: *International Energy Agency* [online]. France: International Energy Agency, 2014 [cit. 2018-03-23].
- [3] DISSANAYAKE, D.M.K.W., C. JAYASINGHE a M.T.R. JAYASINGHE. A comparative embodied energy analysis of a house with recycled expanded polystyrene (EPS) based foam concrete wall panels. *Energy and Buildings*. 2017, **135**, 85-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.044>. ISSN 0378-7788.
- [4] LUCON, O. a ÜRGE-VORSATZ, D. Chapter 9. Buildings. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. 1st. New York, USA: Cambridge University Press, 2014, s. 671-738. ISBN 978-1-107-65481-5.
- [5] *CI2 o.p.s.* 2013. Dostupné také z: <http://ci2.co.cz/cs/hranice-analyzy-uhlikove-stop>
- [6] FISCHEDICK, M. a J., ROY. Chapter 10. Industry. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. 1st. New York, USA: Cambridge University Press, 2014, s. 739-810. ISBN 978-1-107-65481-5.
- [7] PlasticsEurope: Plastics - the Facts 2017, An analysis of European plastics production, demand and waste data. *PlasticsEurope* [online]. 2017 [cit. 2018-02-27].
- [8] OZBAKKALOGLU, Togay. Short-Term Mechanical Properties of Concrete Containing Recycled Polypropylene Coarse Aggregates under Ambient and Elevated Temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*. American Society of Civil Engineers, 2017, **29**(10), 04017191. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002046.
- [9] AL-TABBAA, A. 19 - Reactive magnesia cement. *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. Woodhead Publishing, 2013, s. 523-543. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857098993.4.523>. ISBN 9780857094247.

- [10] PAVLÍKOVÁ, M. a KEPPERT M. *Chemie: chemie stavebních materiálů*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04237-3.
- [11] LI, Z. a CHAU, C. K. Influence of molar ratios on properties of magnesium oxychloride cement. *Cement and Concrete Research*. 2007, **37**(6), 866-870. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.015>. ISSN 00088846.
- [12] CHAU, C. a Li Z. Microstructures of magnesium oxychloride. *Materials and Structures*. 2008, **41**(5), 853-862. DOI: 10.1617/s11527-007-9289-y. ISSN 18716873.
- [13] LIU, Z. Experimental investigation on the properties and microstructure of magnesium oxychloride cement prepared with caustic magnesite and dolomite. *Construction and Building Materials*. 2015, **85**, 247-255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.056>. ISSN 09500618.
- [14] KORBEL, P. a NOVÁK M. *The Complete Encyclopedia of Minerals*. 1st. United Kingdom: Grange Books PLC, 2001. ISBN 1 84013 404 6.
- [15] VELEBIL, D. Geologie. *Geologie, mineralogie, historie dolování* [online]. Praha: Národní muzeum v Praze, mineralogicko-petrologické oddělení, 2005 [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <http://www.velebil.net/>
- [16] *Surovinové zdroje České republiky: Neroztné suroviny 2016*. Ministerstvo životního prostředí, 2016, **2016**.
- [17] BALÁŽ, P. *Nerastné Suroviny Slovenskej Republiky 2014: Štatistické údaje do roku 2013*. 1. Spišská Nová Ves - Bratislava: Štátny geologický ústav Dionýza Štúra 2014, 2014. ISBN 978-80-8174-004-6.
- [18] RUAN, S. a UNLUER, C. Comparative life cycle assessment of reactive MgO and Portland cement production. *Journal of Cleaner Production*. 2016, **137**, 258-273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.071>. ISSN 09596526.
- [19] WALLING, S. a PROVIS, J. L. Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future?: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future?. *Chemical Reviews*. American Chemical Society, 2016, **116**(7), 4170-4204. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00463. ISSN 0009-2665.
- [20] Stupeň Baumé. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Stupe%C5%88_Baum%C3%A9

- [21] MISRA, A. a R. MATHUR. Magnesium oxychloride cement concrete. *Bulletin of Materials Science*. 2007, **30**(3), 239-246. DOI: 10.1007/s12034-007-0043-4. ISSN 0973-7669. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s12034-007-0043-4>
- [22] SGLAVO, V.M. Influence of curing temperature on the evolution of magnesium oxychloride cement. *Journal of Materials Science*. 2011, **46**(20), 6726-6733. DOI: 10.1007/s10853-011-5628-z.
- [23] XU, B. Influence of curing regimes on mechanical properties of magnesium oxychloride cement-based composites. *Construction and Building Materials*. 2016, **102**, 613-619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.205>. ISSN 0950-0618.
- [24] DUCHÁČEK, V. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2016, 12-17 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [25] YU, L. Development and application of expanded polypropylene foam. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2013, **28**(2), 373-379. DOI: 10.1007/s11595-013-0698-1. ISSN 1993-0437.
- [26] MAREK, P. Výroba a aplikace expandovaného polypropylenu. *PlasticPortal* [online]. 2013 [cit. 2018-02-27].
- [27] MORRIS, C. Linseed oil for protection of concrete surfaces. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 1961, **38**(5), 24-26. DOI: 10.1007/BF02636783. ISSN 1558-9331.
- [28] Ruční nářadí: Lněný olej a fermez v tradiční truhlářině a nástrojařině. *Ruční nářadí* [online]. 2010 [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <http://rucni-naradi.blog.cz/1004/lneny-olej-a-fermez-v-tradicni-truhlarine-a-nastrojarine>
- [29] ČSN EN 14016-1 (72 2483). *Látky pro hořčnatou maltovinu pro potěrové materiály: Kaustický magnezit a chlorid hořčnatý - Část 1: Definice, požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [30] ČSN EN 14016-2 (72 2483). *Látky pro hořčnatou maltovinu pro potěrové materiály - Kaustický magnezit a chlorid hořčnatý: Část 2: Zkušební metody*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [31] ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu: Část 5: Zkouška rozlitím*. Český normalizační institut, 2009.

- [32] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu: Část 1: Stanovení pevnosti*. Český normalizační institut, 2016.
- [33] ČSN EN ISO 12572. *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků: Stanovení propustnosti vodní páry - Misková metoda*. Český normalizační institut, 2017.
- [34] ČSN EN 1015-18. *Zkušební metody malt pro zdivo: Část 18: Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě*. Český normalizační institut, 2003.
- [35] ČSN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov: Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. 1. Český normalizační institut, 2005.
- [36] COLANGELO, Francesco. Recycled polyolefins waste as aggregates for lightweight concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2016, **106**, 234-241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.041>. ISSN 1359-8368.

Seznam obrázků

Obr. 1: Přímé a nepřímé emise GHG u komerční a obytných budov [4].	10
Obr. 2: Spotřeba energie v rozdílných oblastech v roce 1990 a 2010 [1].	11
Obr. 3: Evidovaná ložiska dolomitu České republiky [16].	14
Obr. 4: Mapa evidovaných ložisek dolomitu na území Slovenské republiky [17].	15
Obr. 5: Mapa evidovaných ložisek magnezitu na území Slovenské republiky [17].	16
Obr. 6: Diagram výroby 1 tuny portlandského cementu (a) a reaktivního MgO (b) [18].	18
Obr. 7: Grafické porovnání zatížení životního prostředí z produkce MgO a PC [18].	20
Obr. 8: Nárůst pevnosti vzorků MOC po dobu 14 dnů [12].	22
Obr. 9: Pevnost vzorků MOC po třech dnech [12].	22
Obr. 10: Jednotlivé režimy zrání vzorků MOC [23]	25
Obr. 11: Pevnost v tlaku vzorků MOC jednotlivých režimů zrání [23]	26
Obr. 12: Pevnost záměsí betonu s plnivem z PP [8].	27
Obr. 13: Plnivo použité k výrobě – normalizovaný písek (vlevo), odpadní EPP (vpravo).	30
Obr. 14: Zrnitostní křivka EPP	31
Obr. 15: Zkušební tělesa - HP REF (nalevo), HPP 150 (napravo).	32
Obr. 16: Zkouška rozlívání směsi HPP 150.	33
Obr. 17: Zkušební trámec HPP 150.	34
Obr. 18: Heliový pyknometr.	34
Obr. 19: Vzorky HP REF (nalevo) a HPP 150 (napravo) po uložení ve vodě.	39
Obr. 20: Nárůst pevnosti v tlaku f_c (MPa) směsi HP REF.	41

Seznam tabulek

Tab. 1: Vliv MOC a PC produktů na životní prostředí [18].....	19
Tab. 2: Molární poměry vzorků MOC [12].....	21
Tab. 3: Pevnost v tlaku v závislosti na koncentraci roztoku [21].....	23
Tab. 4: Modul pružnosti v závislosti na koncentraci roztoku [21].....	24
Tab. 5: Výsledné hodnoty výpočtu potřebné energie [3].	28
Tab. 6: Požadované parametry kaustického magnezitu.....	30
Tab. 7: Receptura směsí hořčnaté maltoviny.....	32
Tab. 8: Přesnost měření přístroje ISOMET 2114.....	37
Tab. 9: Rozliv směsí hořčnaté maltoviny.	40
Tab. 10: Základní materiálové charakteristiky směsí hořčnatých maltovin.	40
Tab. 11: Pevnosti směsí HP REF po 3, 7, 14, a 28 dnech zrání.	41
Tab. 12: Pevnostní charakteristiky jednotlivých směsí po 28 dnech zrání.....	41
Tab. 13: Tepelně technické vlastnosti hořčnatých směsí.....	42
Tab. 14: Difuzní vlastnosti směsí hořčnaté maltoviny.	43
Tab. 15: Sorpční vlastnosti směsí.....	43